Liebe Leserinnen, liebe Leser!



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Neue Technologien und Erkenntnisse aus dem Labor revolutionieren die Medizin – von Genetik über Neurobiologie bis hin zu Robotik. So kommt es nicht von ungefähr, dass sich diese Ausgabe von Spektrum der Wissenschaft schwerpunktmäßig medizinischen Themen widmet – der Herzchirurgie, der Zahnmedizin und dem weltweiten Impfproblem. Freilich bieten solche Artikel oft nur Versprechungen und Prophezeiungen, auf die wenig Verlass ist. Doch diesmal berichten wir von Behandlungsfortschritten, die teils schon Kliniken und Patienten erreicht haben.

1. **Herz**. Bypassoperationen – weltweit rund 800 000 pro Jahr – sind kostspielig und nach wie vor riskant. Der Brustkorb muss aufgesägt, der etwa einstündige Herzstillstand mit einer Herz-Lungen-Maschine überbrückt werden. Seit Anfang der neunziger Jahre verfolgen Mediziner schonendere Ansätze. Bypässe lassen sich auch am schlagenden Herz anbringen – ohne Herz-Lungen-Maschine. Bis zum Jahr 2005 soll die Hälfte dieser Operationen so durchgeführt werden. Sogar das traumatische Aufsägen des Brustkorbs lässt sich inzwischen vermeiden. Die neue Technik – bereits praktiziert in München, Leipzig und Dresden – verdankt ihren Erfolg nicht zuletzt einem Roboter, der den Chirurgen beim Eingriff unterstützt (Seite 50).

2. **Zähne**. Vom Zahnschmerz geplagt, begibt sich jeder notgedrungen, aber nicht immer gerne in Medizinerhände. Dabei hat in der Zahntechnik in den letzten Jahren eine Revolution stattgefunden: Raffiniertere Diagnostik, neue Materialien und endlich ein Paradigmenwechsel in Richtung einer konservierenden Präventionsmedizin kennzeichnen die moderne Zahnarztpraxis. Motto: vom Klempner zum Dienstleister (Seite 84).

3. **Seuchen**. Es klingt unglaublich: Jährlich sterben zwei Millionen Kinder vor allem in der Dritten Welt an Seuchen, weil sie nicht geimpft wurden. Warum? Klassische Impfstoffe müssen gekühlt, transportiert und zumeist per Spritzen verabreicht werden. Das erfordert ein Versorgungssystem, das vor allem die Ärmsten der Armen nicht erreicht. Seit einem Jahrzehnt arbeiten deshalb Pflanzengenetiker an einer „lokalen Lösung“, nämlich daran, essbare Impfstoffe zu erzeugen, die vor Ort angebaut werden können. Dafür werden Bananen, Tomaten oder Kartoffeln genetisch so verändert, dass ihr Verzehr zugleich gegen bestimmte Krankheiten immunisiert (Seite 64).

Noch werden diese Produkte an Tieren getestet. Erweisen sie sich als erfolgreich, profitieren wir alle. Denn in einer mobilen Welt könnte uns die Wiederkehr der Seuchen mit einer Wucht treffen, die sich heute noch niemand vorstellen mag.

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

PS: Johannes Kepler war einer der großen Wegbereiter der modernen Astronomie. Ohne seine Hartnäckigkeit, die Umlaufbahn des Planeten Mars penibel zu analysieren, wären die Planetengesetze vermutlich erst viel später entdeckt worden. Dass der Kaiserliche Hofastronom aber auch seine Mutter vor dem Hexentod durch Verbrennung retten musste, lesen Sie in unserer neuen Biografie über den großen Schwaben.

TITELBILD:

Zwei Sonnen scheinen am Himmel dieses Planeten im Doppelsternsystem CM Draconis.

Illustration: Mark A. Garlick

MONATSSPEKTRUM

SPEKTROGRAMM

HAUPTARTIKEL



TITELTHEMA: ASTRONOMIE

Die Suche nach erdähnlichen Planeten

Seite 42

Von L. R. Doyle, H.-J. Deeg und T. M. Brown

Außerhalb unseres Sonnensystems haben Astronomen bereits Dutzende von Riesenplaneten ausfindig gemacht. Inzwischen sind ihre Messmethoden ausgefeilt genug, um auch extrasolare Himmelskörper von der Größe unserer Erde zu entdecken.

KLONEN

Die neue Arche Noah

Seite 34



Von Robert P. Lanza, Betsy L. Dresser und Philip Damiani

Um selten gewordene Tiere vor dem Aussterben zu retten, könnte man sie klonen. Leihmütter, die zu einer nicht bedrohten Art gehören, würden die Klone austragen.

MEDIZINTECHNIK

Operieren am schlagenden Herz

Seite 50

Von Cornelius Borst

Bypass-Operationen am Herz – riskant, aber oft lebensrettend – werden schonender. Hightech-Robotersysteme für die Herz-Chirurgie brauchen nur noch knopflochgroße Schnitte als Zugang, und dank mechanischer Herzstabilisatoren kann das Organ während des Eingriffs sogar weiterschlagen.



ARCHÄOLOGIE

Wracksuche im Bodensee

Seite 56

Von Klaus-Dieter Linsmeier

Jahrhundertelang diente Deutschlands größter Binnensee als Drehscheibe für den über-regionalen Handel, doch die Geschichte seiner Schifffahrt erkunden Archäologen erst seit wenigen Jahren. Mitunter auch in dunkler Tiefe.

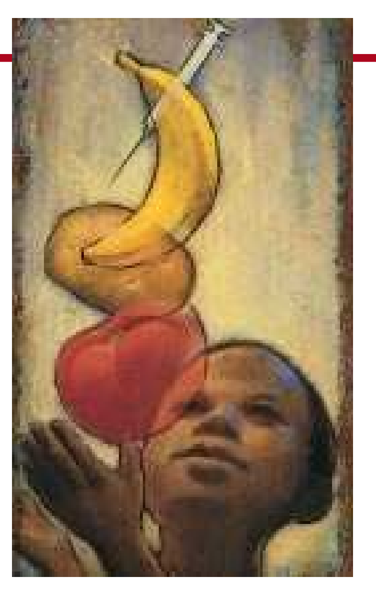
GENTECHNIK

Essbare Impfstoffe

Seite 64

Von William H. R. Langridge

Jedes Jahr sterben Millionen Menschen, weil sie keinen Zugang zu traditionellen Impfstoffen haben. Vor allem viele Kinder könnten vor oft tödlichen Krankheiten bewahrt werden, wenn es gelingt, sie allein durch Essen von genetisch veränderten Bananen und anderen Früchten zu impfen.



EXPEDITION

Tödliche Gaswolken aus afrikanischen Seen

Seite 70

Von Marguerite Holloway

Zwei Seen in Kamerun setzten in den achtziger Jahren tödliche Gaswolken frei, denen mehr als 1700 Menschen und ungezählte Tiere zum Opfer fielen. Da sie jederzeit wieder ausbrechen könnten, versuchen Wissenschaftler nun im Wettlauf mit der Zeit eine weitere Tragödie zu verhindern.


Szilard Fermi

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Fermi, Szilard und der erste Atomreaktor

Seite 78

Von William Lanouette

Kurz vor Beginn des Zweiten Weltkriegs trafen in den USA zwei aus Europa emigrierte Physiker zusammen, die nur in ihrer Begeisterung für die Wissenschaft übereinstimmten. Dennoch glückte dem ungleichen Paar der Bau des ersten Kernreaktors.

Spektrum-Report: Zahnmedizin

Seite 84

Bessere Präparationstechniken und Werkstoffe sollen den Verlust an Zahnsubstanz begrenzen, neue diagnostische Verfahren Zahnerkrankungen im Frühstadium ausmachen.

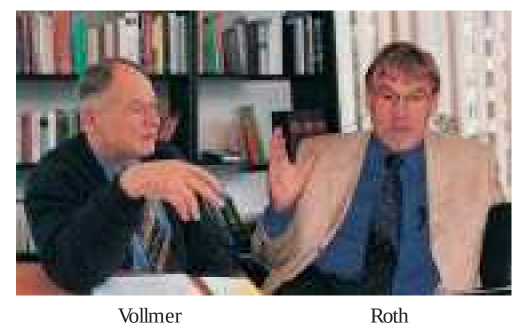
Themen:
Karies unter Strom
Implantate & Co.
Das schleichende Übel



Es geht ans Eingemachte – Streitgespräch zwischen G. Vollmer und G. Roth – Oktober 2000

Der Glaube an das Machbare

Das Interview macht zweierlei deutlich: Einerseits ist künstliches Bewusstsein eine Frage des eigenen Bewertungs- und Entscheidungssystems, also der Autonomie des Automaten, andererseits entpuppt sich vor dem Hintergrund der Bewusstseinsforschung die menschliche Willensfreiheit als Illusion. Wir haben bereits heute so viel praktische Kompetenz formalisiert und somit abgegeben, dass das Netzwerk unserer objektivierten Intelligenz komplex und in sich rückgekoppelt genug sein dürfte, um schon jetzt als selbstorganisierendes und weitaus überlegenes Subjekt gelten zu können, mehr Leviathan als Golem. Bill Joys Forderung nach einem Moratorium für die KI-Forschung erscheint mir deshalb etwas hilflos. Es gibt hier nichts aufzuhalten, ist es doch gerade der Glaube an das Machbare, der diesen beunruhigenden Evolutionsschritt bewirkt. Der Geist ist „raus" aus der Kleinschen Flasche. Geplatzt ist bloß wieder mal die Illusion, dass wir die Welt beherrschen.



Vollmer Roth

Prof. Peter Angermann, Thurndorf

Computer-Roboter ohne Machtgefühl

Das vermeintliche Fehlen eines limbischen Systems wird nicht der Grund sein, der uns vor der Machtübernahme durch die Computer schützt. Seit langem existieren technische limbische Systeme, sie heißen allerdings anders, nämlich „Sollwertgeber" in Regelprozessen. Entscheidend für etwaige Gefahren durch machtbesessene Computer ist, ob diese ihre Umwelt und ihr Innenleben auf irgendeine nicht-physische Weise als Realitäten erkennen, um damit eigenständig mit neuen Erfahrungen umgehen zu können.

Es ist ein Unterschied, ob ein Computer nur auf Bitmuster seiner Sensoren reagiert oder ob er etwas „wahrnimmt", „sieht", „spürt". Im ersten Fall kann man alle Gefahren durch machthungrige Computer-Roboter vergessen, denn erstens spüren sie nicht das berauschende Gefühl der Machtfülle als erstrebenswertes Ziel, und zweitens können sie nur mit Hilfe der Menschen auf neue Herausforderungen reagieren. Ob jedoch Computer-Roboter mit einem geeigneten technischen limbischen System wahrnehmen werden, lässt sich nicht vorhersagen, da jene dritte Entität außerhalb unserer Naturgesetze steht.

Prof. Peter R. Gerke, Gräfelfing

Technischer Fortschritt sozial verträglich

Wichtiger als der Diskurs der Chancen und Risiken von technischer Entwicklung ist die ethische Diskussion, die Joy in seinen Thesen in WIRED kurz anspricht. Trotzdem ist dort immer die Rede von „wir können besser leben" usw.

Doch wir können eben nicht, jedenfalls nicht alle. Wenn die Roboter wirklich mal die ganze Arbeit machen, für wen arbeiten die dann? Für sich selber? Das ist zu weit gegriffen. Für uns alle? Das können nur blauäugige Optimisten glauben. Für die Besitzenden? Darauf dürfte es hinauslaufen.

Wir wären besser beraten, wenn wir den technischen Fortschritt sozial verträglich gestalten würden. Das dürfte die anspruchsvolle Aufgabe unserer Zukunft werden.

Dr. Wilfried Müller, Unterföhring

Anmerkungen von Professor G. Vollmer:

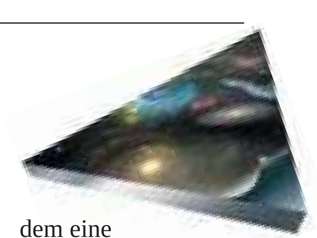
Peter Gerke verweist auf zwei Schwierigkeiten: 1. die Fähigkeiten, künftige Artefakte vorherzusagen, 2. ihnen die entscheidenden Fähigkeiten gezielt einzupflanzen. Es mag ja leicht sein, einem Roboter ein Bewertungssystem einzubauen; ungeheuer schwierig ist es, ihm ein sinnvolles, erfolgreiches, ein für eine unabhängige Existenz brauchbares zu verleihen. Die biologische Evolution braucht dafür Jahrmillionen!

Der Grund für die zweite Schwierigkeit liegt aber weniger in dem vermeintlich nicht-physischen Ursprung unserer geistigen Fähigkeiten. Gerade die Physik beschäftigt sich ausgiebig mit Information, und auch dafür gelten Naturgesetze, zum Beispiel für die Mindestenergie, die man in unserer Welt braucht, um ein Bit zu übertragen. Andererseits können offenbar schon heute Computer hervorragend mit Zahlen umgehen, obwohl sie etwas hoch Abstraktes sind. Die These „Was das Gehirn kann, kann auch die Maschine", ist zwar notorisch umstritten, aber bis heute jedenfalls nicht zwingend widerlegt.

Peter Angermann betont eine dritte Schwierigkeit: die Selbsttäuschung, als Einzelperson sei ich Steuermann oder gar Kapitän der Menschheitsentwicklung. Was geschieht, bestimmen alle Menschen zusammen; aber die Menschheit als Ganzes hat keinen Willen, keine Wünsche, nicht einmal genug Überblick. So wäre zwar vieles im Prinzip machbar (oder verhinderbar); aber wir schaffen es nicht, das Machbare auch wirklich zu machen, das Verhinderbare, etwa die Bevölkerungsexplosion, zu verhindern.

Den Hinweis von Wilfried Müller finde ich äußerst wichtig. Die entscheidende Frage ist nicht: „Sind Computer oder Roboter gefährlich?", sondern „Sind Menschen mit Computern gefährlicher als ohne?" Und diese Frage ist heute ohne weiteres mit Ja zu beantworten. Müllers Forderung, den technischen Fortschritt sozial verträglich zu gestalten, ist völlig berechtigt; sie zu erfüllen, scheitert aber leicht an den genannten drei Schwierigkeiten.

Die unsichtbaren Dimensionen des Universums
Oktober 2000



Scheinbar überlichtschnell

Die Autoren schlagen unter anderem ein „gefaltetesUniversum" vor. In diesem Modell müsste es zu scheinbar überlichtschnellen Wechselwirkungen kommen können, nämlich zwischen Raum-Zeit-Punkten, die durch die Faltung nah aneinander zu liegen kommen. Scheinbar überlichtschnell, weil ja in Wirklichkeit höchstens eine Entfernung von einem Millimeter zu überwinden wäre – allerdings durch eben die „unsichtbaren" Dimensionen.

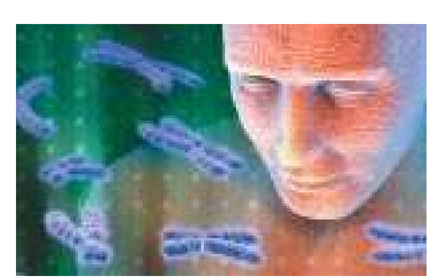
In einem solchen Modell des Universums wäre außerdem eine nahe liegende Hpothese, dass es nicht nur eine oder zwei solcher durch Faltung übereinander liegende Schichten gibt, sondern viele. Hier gäbe es zwischen vielen für uns anscheinend weit entfernten Punkten Abkürzungen durch höhere Dimensionen. Werden also die Hyperraumsprünge früherer Science-Fiction-Raumfahrer doch noch Realität, wenn auch vielleicht beschränkt auf Quantenmaßstab?

Hasko Heinecke, Richterswil, Schweiz

Das Geschäft mit den Genen
September 2000

Nutzen statt Angst

Die Beiträge geben einen ausgezeichneten Überblick über den derzeitigen Stand der Genomforschung. Sie steht sicherlich noch am Beginn. Aber man kann aus den Erkenntnissen schon schrittweise Ansatzpunkte zur Diagnose und der Therapie von Erkrankungen entwickeln. Parallel geht ein enormer Wandel in unserem Denken einher. Zum einen zeigt die Gentechnologie eine neue Bioinformatik, die das Weltbild in einem neuen Licht erscheinen lässt. Zum anderen ergeben sich auch klare rechtliche Informationen und auch Implikationen auf unsere Wirtschaft. Vor 15 Jahren wurde ja gerade in Zentraleuropa Gentechnologie massiv negativ gebrandmarkt, sodass der Boden der Biotechnologie nachhaltig der Landwirtschaft entzogen worden ist.



Die Gentechnologie ist aber noch nicht das Ziel, sondern die Entwicklung in Richtung Proteom, wo der Ansatz des Eingreifens in die Proteinsynthese direkt möglich ist. Vergleichende Genanalysen zeigen Ähnlichkeiten im Aufbau bei der Hefe, dem Wurm, den Fliegen und der Maus. Das hat Einfluss auch auf unser evolutionäres Denken. Die Gentechnologie in diesem Ausmaß weckt nicht nur medizinisches und wirtschaftliches Interesse mit allen juridischen Implikationen, sondern hilft auch theologisch und philosophisch auf der Suche des Menschen nach seiner Basis. Die Forschung darf nicht Angst auslösen, man darf sich nicht blind verschließen, sondern soll mit Zuversicht in die Zukunft schauen.

Prof. Felix Unger, Salzburg

Megacitys – Die bessere Wahl: intermodal
Oktober 2000

Senkung des Fahrpreises

Die Aussage, dass in den westlichen Staaten Passagiere nur durch „höhere Standards wie Komfort, Bequemlichkeit und Design" zum öffentlichen Nahverkehr gelockt werden können, halte ich für nicht zutreffend, denn das hier seit Jahren trotz diverser Preiserhöhungen ungebrochen erfolgreiche „schönes Wochenende"-Ticket beweist das Gegenteil. Haupthinderungsgrund für die Akzeptanz des öffentlichen Personennahverkehrs ist also auch in der industrialisierten Welt der Fahrpreis.

Dr. Andreas Fuß, Staufenberg

Was haben wir mit Hefe, Würmern, Fliegen und Mäusen gemein? – September 2000

Durchbrüche bei Prokaryonten

Hier fehlen bei den Modell-Organismen der Genom-Forschung komplett die Bakterien und Archäa. Bei diesen wurden die Durchbrüche und Quantensprünge in der Entwicklung der biologischen Forschung erzielt.

Dutzende bakterieller und archäeller Genome sind bereits sequenziert worden, etwa zwei Dutzend sind öffentlich zugänglich. Da die Pflanzen und Tiere lediglich artenreiche Randgruppen im Reich der Lebewesen sind, sind somit die Baupläne für die ganze Breite unterschiedlicher Lebensmöglichkeiten bei den Mikroorganismen zu finden.

Während die Genome der Vielzeller hauptsächlich aus gestückelten Genen mit viel Müll dazwischen bestehen, sind die Gene der Prokaryonten meistens direkt in die vermutlichen Proteinsequenzen übersetzbar. Da Proteine sich auch zu evolutionären Verwandtschaftsgruppen ordnen lassen und diese sehr oft in allen drei Organismen-Reichen vorhanden sind, brauchen die Vielzeller-Forscher die Ergebnisse der mikrobiologischen Forschung, um überhaupt an sinnvolle Hypothesen über die Funktion „ihrer" Gene zu gelangen.

Prof. Dietrich H. Nies, Halle

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 504-716

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke, E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Layout: Sibylle Franz, Andreas Merkert, Natalie Schäfer, Karsten Kramarczik (Artwork Coordinator)
Online-Redaktion: Antje Findeklee, Elke Reinecke, Christoph Roloff, E-Mail: online@spektrum.com
Redaktionsassistenz: Cornelia Schenck, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 504-711, Fax (0 62 21) 504-716
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: GHALT@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktion: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 504-730
Marketing und Vertrieb: Annette Baumbusch, Markus Bossle Tel. (0 62 21) 504-741/742, E-Mail: marketing@spektrum.com
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Hans J. Deeg, Dr. Immo Diener, Dr. Markus Fischer, Dr. Udo Gansloßer, Dr. Susanne Lipps, Peter Schütz, Dr. Michael Springer.
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Vangerowstraße 20, 69115 Heidelberg Tel. (0 62 21) 504-60, Fax (0 62 21) 504-751.
Geschäftsführer: Dean Sanderson
Leser-Service: Marianne Blume; Tel. (0 62 21) 504-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft DM 12,90/sfr 12,90/öS 98,–; im Abonnement DM 142,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) DM 123,60. Die Preise beinhalten DM 10,80 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen DM 10,20 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung: Andreas Formen Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (06221) 504-748, Fax -758 Verkaufsberatung: Sabine Ebert, (06221) 504-749, Fax -758; verantwortlich für Anzeigen: Gabriele Reichard Kasernenstraße 67, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-2341/93, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Gunter-E. Hackemesser, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 84, Fax (0 40) 33 90 90; Hannover: Egon F. Naber, Sextrostraße 3-5, 30169 Hannover, Tel. (05 11) 9 88 47 14, Fax (05 11) 8 09 11 23; Düsseldorf: Cornelia Koch, Werner Beyer, Herbert Piehl, Klaus-P. Barth, Zollhof 30, 40221 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 30 135-20 57, Fax (02 11) 13 39 74; Frankfurt: Anette Kullmann, Dirk Schaeffer, Markus Horn, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16-18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 82; Stuttgart: Erwin H. Schäfer, Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf Tel. (02 11) 8 87-23 84, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Zur Zeit gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 22 vom 1. Januar 2001.
Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 100017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Sandra Ourusoff, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman Emeritus: John J. Hanley, Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg; Vice President, Technology: Richard Sasso

ATMOSPHÄRENCHEMIE

Bodennahes Ozonloch in der Arktis

Erst kürzlich entdeckten Atmosphärenforscher, dass in der Nordpolarregion im Frühjahr immer wieder kurzfristig alles Ozon in der unteren Atmosphäre verschwindet. Was verursacht dieses überraschende Phänomen?

Von Rolf Sander und Paul J. Crutzen

Dass Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) die Ozonschicht schädigen, ist mittlerweile Allgemeinwissen. Vor allem verursachen sie das berüchtigte Ozonloch über der Antarktis, das alljährlich im Frühling auf der Südhalbkugel auftritt (wenn bei uns Herbst ist). Auch die jüngst festgestellte Ausdünnung der Ozonschicht über der Nordpolarregion im Frühjahr geht auf FCKWs zurück, die früher in großen Mengen als Treibgase für Sprühdosen, zum Feuerlöschen und als Wärmetauscher in Kühlschränken verwendet wurden.

Die beiden genannten Ozonlöcher befinden sich allerdings nicht am Boden, sondern in der Stratosphäre in ungefähr 12 bis 22 Kilometer Höhe. Dort wirkt die dreiatomige Modifikation des Sauerstoffs als Schutzschild gegen die schädliche UV-Strahlung der Sonne. Die Ausdünnung und Durchlöcherung dieses Schildes ist das eigentlich Bedrohliche am Rückgang des stratosphärischen Ozons.



Während des „Polar Sunrise Experiment 2000“ nahe der kanadischen Siedlung Alert wurden mit diesem Messturm meteorologische Daten und Ozonwerte ermittelt.

JAN BOTTENHEIM, ENVIRONMENT CANADA

Vor einigen Jahren wurde nun aber am Nordpol auch in der untersten Schicht der Atmosphäre – der Troposphäre – ein Ozonloch gefunden: Mehrmals im arktischen Frühling verschwindet über einer Fläche von einigen tausend Quadratkilometern das Gas dort vollständig. Der Vorgang läuft sehr schnell ab: Innerhalb weniger Stunden kann alles Ozon vernichtet sein.

Anders als sein stratosphärisches Gegenstück hat dieses Ozonloch zwar keine negativen Auswirkungen. Im Gegenteil: Ozon am Boden ist in höheren Konzentrationen gesundheitsschädlich; das merken wir vor allem beim Smog im Hochsommer. Dennoch war die verblüffende Beobachtung faszinierend und auch etwas beunruhigend: Zeigte sie doch, dass die Chemie der Atmosphäre noch immer Überraschungen parat hat und die Wissenschaft längst nicht alle Vorgänge kennt, die sich in der irdischen Lufthülle abspielen.

Wie es öfter geschieht, wurde auch diese Entdeckung zufällig beim Studium eines anderen Phänomens gemacht. Ende der siebziger und Anfang der achtziger Jahre untersuchten Umweltforscher den Transport von anthropogenen Verschmutzungen in die Arktis, wo sich daraus der so genannte arktische Dunst bildet. Für diesen Zweck errichteten sie ein Netzwerk von Messstationen für verschiedene Gase. Bald fiel auf, dass die Monatsmittel für Ozon im Frühling niedriger lagen als in den anderen Jahreszeiten. Wie weitere Nachforschungen zeigten, sanken die Werte in dieser Jahreszeit allerdings nicht gleichmäßig ab; vielmehr gingen die Ozongehalte nur episodisch auf Null zurück und bewegten sich dazwischen im normalen Bereich.

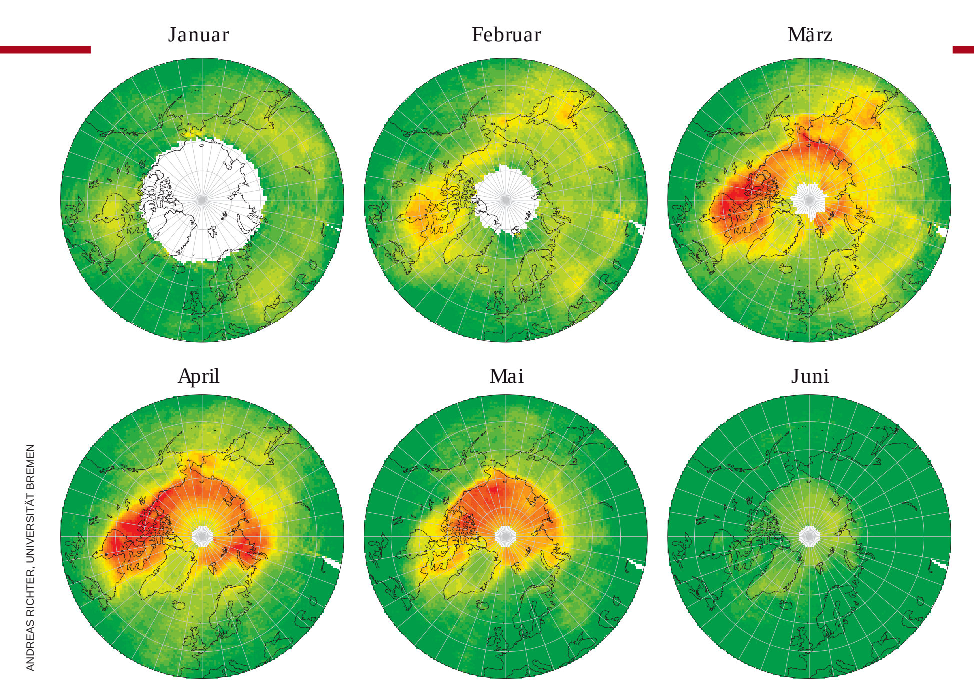
Was war die Ursache der seltsamen Schwankung? Einen deutlichen Hinweis lieferten die Messwerte für eine andere Klasse von Substanzen: reaktive Bromverbindungen. Gleichzeitig mit dem Ozonverlust stieg deren Konzentration in der Luft an.

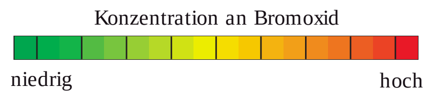
Brom kurbelt Vernichtungskreislauf an

Diese Beobachtung war Anlass, in mehreren großen Feldkampagnen dem Phänomen auf den Grund zu gehen. So findet nun fast jedes Jahr im Frühling ein „Polares Sonnenaufgangsexperiment“ (PSE) bei der Siedlung Alert in Kanada (82 Grad Nord) statt. Außerdem wurden auf der europäischen Seite Messkampagnen auf Spitzbergen (79 Grad Nord) durchgeführt. Diese Untersuchungen haben wesentlich dazu beigetragen, die Chemie der arktischen Ozonzerstörungs-Episoden aufzuklären. Danach gibt es auffallende Ähnlichkeiten, aber auch grundlegende Unterschiede zur Entstehung des stratosphärischen Ozonlochs.

In beiden Fällen kurbelt ein Stoff eine chemische Reaktion an, in deren Verlauf Ozon zu normalem zweiatomigem Sauerstoff-Gas abgebaut wird. Er wirkt dabei als so genannter Katalysator, der zwar in die Reaktion eingreift, selbst aber nicht verbraucht wird. Deshalb können bereits kleinste Mengen der Substanz eine enorme zerstörerische Wirkung entfalten.

Beim stratosphärischen Ozonloch spielt hauptsächlich Chlor die Rolle dieses Katalysators, beim neu entdeckten Loch in der arktischen Troposphäre ist es dagegen das Brom, das in einer völlig analogen Reaktion Ozon abbaut. So hat ein Messgerät an Bord des europäischen





Messungen mit dem europäischen Radarsatelliten ERS-2 zeigen, dass auch im letztjährigen Frühling wieder erhöhte Konzentrationen von bodennahem Bromoxid, das bei der Zerstörung von Ozon entsteht, in der Arktis auftraten.

ANDREAS RICHTER, UNIVERSITÄT BREMEN

Forschungssatelliten ERS-2 im Frühling wiederholt in der gesamten arktischen Troposphäre erhöhte Konzentrationen von Bromoxid (BrO) gemessen, das beim Ozon-Abbau vorübergehend entsteht. Bereits ein Anteil von 1 zu 100 Milliarden Luftmolekülen reicht für das Zerstörungswerk aus.

Wie kann dieses sehr reaktionsfreudige Gas lange genug in der unteren Atmosphäre bleiben, ohne durch die vielen Stoffe dort in weniger reaktive Verbindungen umgewandelt zu werden? Beispielsweise sollten winzige Schwebteilchen – so genannte Aerosolpartikel – Bromverbindungen aus der Luft aufnehmen und sie auf diese Weise abfangen.

Genauere Untersuchungen zeigten jedoch, dass die Aerosolpartikel in Wahrheit genau das Gegenteil bewirken. In ihrem Inneren finden chemische Reaktionen statt, die inaktive Bromverbindungen wie Bromwasserstoff in einer Art Recycling wieder in reaktive Formen wie zweiatomiges Brom verwandeln und sie in die Gasphase zurückbefördern, wo sie ihr Zerstörungswerk fortsetzen.

Hinzu kommt, dass ein Teil der Aerosolpartikel aus Salzwasser-Tröpfchen vom Meer besteht. Diese enthalten ihrerseits Brom und schleusen es in den Kreislauf ein. Dadurch können sie mehr reaktive Bromverbindungen erzeugen als sie in inaktiver Form aufnehmen. Der Reaktionszyklus beschleunigt sich somit selbst. Diese so genannte Bromexplosion erklärt, warum in kurzer Zeit alles Ozon zerstört werden kann.

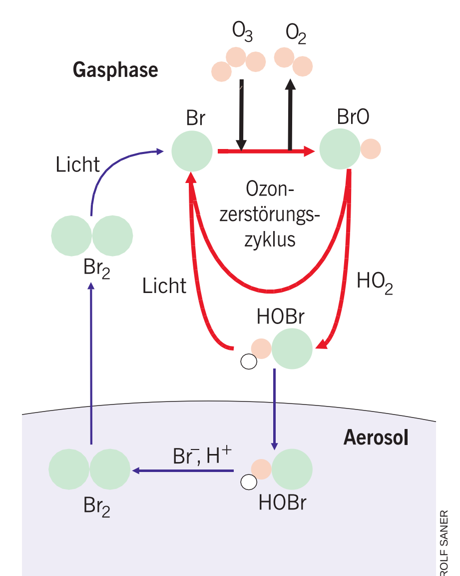
Was aber ist die eigentliche Bromquelle, und wieso findet der Ozon-Abbau nur im Frühjahr statt? Organische Bromverbindungen menschlichen Ursprungs scheiden aus, weil die Sonnenstrahlung in Bodennähe nicht stark genug ist, um solche Moleküle in ausreichender Menge zu spalten. Einen wichtigen Hinweis auf die Bromquelle lieferten meteorologische Beobachtungen. So kommt es nur dann zum Abbau des Ozons, wenn der Wind vom Meer her weht. Demnach dürfte das Brom aus dem Meerwasser stammen.

Allerdings wird es nicht direkt von der See herangeführt, da sich andere Komponenten von Meersalz-Aerosolen während der Ozonabbau-Episoden nicht ähnlich stark in der Luft anreichern wie das Brom. Außerdem ließe sich so nicht verstehen, warum das Ozon nur im Frühjahr verschwindet.

Die Erklärung ist vermutlich, dass sich während der arktischen Nacht Salzaerosole am Rand der Packeiszone ablagern und dort allmählich ansammeln. Sobald die Sonne im Frühling aufgeht, aktiviert sie das Brom aus diesen Ablagerungen. Wenn es dann zusammen mit frischen Meersalz-Aerosolen über das Packeis geweht wird, verursacht es dort die komplette Vernichtung des Ozons. Inzwischen gibt es auch Hinweise darauf, dass solche bodennahen Ozonzerstörungs-Episoden auch regelmäßig im antarktischen Frühling auftreten.

Da Meerwasser die Hauptquelle des zerstörerischen Broms ist, handelt es sich also um ein rein natürliches Phänomen. Dennoch kann es nicht isoliert von anderen Bereichen der Atmosphärenchemie gesehen werden. Mit Computermodellen untersuchen wir zur Zeit, ob reaktive Halogene (Chlor, Brom und Iod) auch in anderen Regionen und Jahreszeiten eine Rolle in der Ozonchemie über den Ozeanen spielen können. Diese Simulationen sowie die Feldmessungen und Auswertungen von Satellitendaten führen wir zusammen mit anderen deutschen (in Bremen und Heidelberg) und ausländischen Arbeitsgruppen durch.

Noch sind die Atmosphärenforscher erst dabei, die komplexen Zusammenhänge zwischen Luftverschmutzung, Klimaänderung und stratosphärischem Ozonloch zu verstehen. Umso wichtiger ist es, unerwartete Befunde mit den bekannten Tatsachen in Einklang zu bringen. ■



Im hier vereinfacht dargestellten Kreislauf der Ozonzerstörung bilden sich in Aerosolteilchen reaktive Bromverbindungen wie Bromchlorid (BrCl) oder Dibrom (Br_2), aus denen durch Einwirkung des Sonnenlichtes Brom-Radikale (Br) entstehen. Diese reagieren mit Ozon zu normalem Sauerstoff und Bromoxid, das in Aerosolteilchen wieder in reaktive Bromverbindungen zurückverwandelt wird.

ROLF SANER

Dr. Rolf Sander *befasst sich in der Abteilung Chemie der Atmosphäre am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz unter anderem mit der Computermodellierung von Halogen- und Ozonchemie in der Troposphäre.*
Dr. Paul J. Crutzen *leitete diese Abteilung bis Juli 2000. Für seine Untersuchungen zur Ursache des Ozonlochs erhielt er 1995 den Chemie-Nobelpreis. Weblink:* www.mpch-mainz.mpg.de/~sander/res/spektrum.html

SINNESPHYSIOLOGIE

Turbo im Ohr

Die Sinneszellen im Innenohr fungieren anscheinend zugleich als mechanische Verstärker. Dabei nutzen sie offenbar ungewöhnliche Motorproteine, die elektrische statt chemischer Energie verbrauchen.

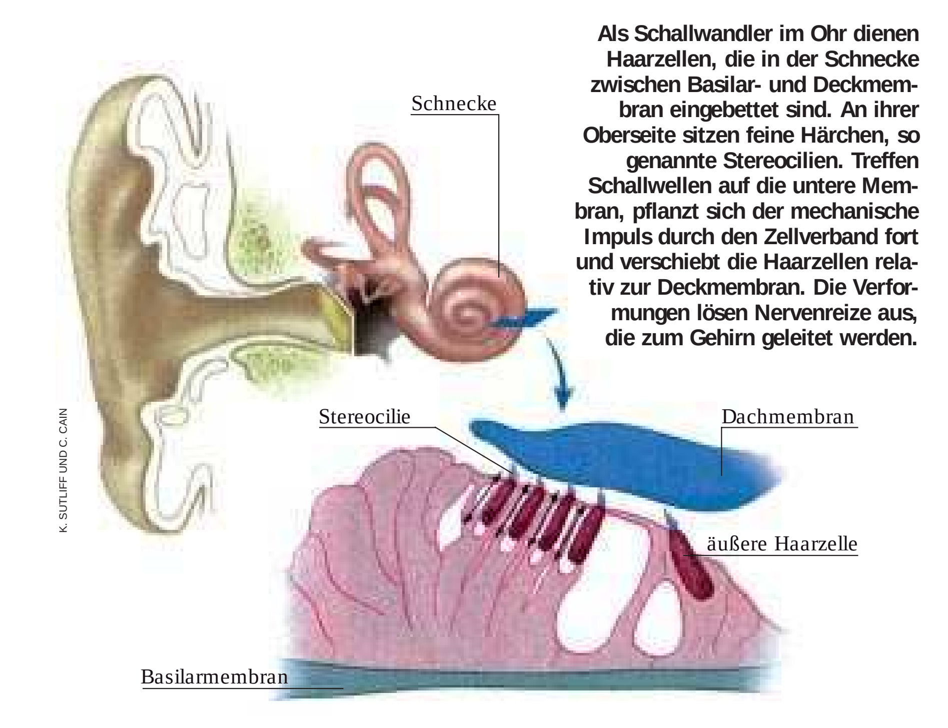
Von Hanno Charisius

Zwar kann es das menschliche Gehör bei weitem nicht mit dem von Hunden oder gar Fledermäusen aufnehmen, trotzdem leistet es Beachtliches: Junge, gesunde Menschen nehmen Töne über das weite Frequenzspektrum von 20 bis 20 000 Hertz wahr – und das in einem breiten Empfindlichkeitsbereich; denn das leiseste noch hörbare Geräusch ist millionenmal schwächer als das lauteste, das gerade die Schmerzgrenze erreicht.

Der Hörvorgang ist buchstäblich eine haarige Angelegenheit: Zellen im Innenohr, an deren Oberseite filigrane Härchen – so genannte Stereocilien – sitzen, wandeln die Schallwellen in elektrische Reize um (Bild unten). Die Haarzellen liegen zwischen zwei Membranen. Sie selbst sind unten mit der so genannten Basilarmembran verwachsen, während die Stereocilien oben in eine Deckmembran ragen. Treffen Schallwellen auf die untere Membran, pflanzt sich der mechanische Impuls durch den gesamten Zellverband fort und verschiebt die Haarzellen relativ zur Deckmembran. Die Verformungen lösen Nervenreize aus, die zum Gehirn geleitet werden, das dann interpretiert, ob es sich bei dem Geräusch um eine Opernarie oder das Pfeifen eines Teekessels handelt.

Bereits im Jahre 1948 postulierte Tommy Jones, damals Astrophysiker an der Universität Cambridge, dass die Haarzellen keine einfachen Empfänger sind, sondern den eintreffenden Schall zusätzlich verstärken. Er stieß mit seinen Überlegungen allerdings auf taube Ohren. Die Hörzellen, so die damalige Lehrmeinung, könnten wie eine angeschlagene Klaviersaite ausschließlich passiv auf eintreffenden Schall reagieren. Eine Verstärkung finde nur auf der Ebene der Nerven statt und nicht über ein mechanisches System im Hörorgan selbst.

Doch dreißig Jahre später fanden sich tatsächlich Hinweise auf eine biomechanische Verstärkung des Schalls im Ohr. Ende der siebziger Jahre zeigten physiologische Studien, dass die meisten Haarzellen von Säugetieren in einem elektrischen Wechselfeld von sich aus schwingen. Außerdem stellte sich heraus, dass im Ohr selbst unentwegt Schwingungen entstehen. Als so genannte otoakustische Emissionen kann sie der Ohrenarzt heute auf der Außenseite des Trommelfells mit einem Mikrofon hörbar machen. Ihr Fehlen deutet in den allermeisten Fällen auf Funktionsstörungen oder Defekte im Innenohr hin. Das Hörorgan funktioniert also offenbar nicht nur als Empfänger für eintreffende Schallwellen, sondern erzeugt selbst permanent Schwingungen.



Als Schallwandler im Ohr dienen Haarzellen, die in der Schnecke zwischen Basilar- und Deckmembran eingebettet sind. An ihrer Oberseite sitzen feine Härchen, so genannte Stereocilien. Treffen Schallwellen auf die untere Membran, pflanzt sich der mechanische Impuls durch den Zellverband fort und verschiebt die Haarzellen relativ zur Deckmembran. Die Verformungen lösen Nervenreize aus, die zum Gehirn geleitet werden.

Aktive Vibrationen verstärken Schall

Seit dieser Entdeckung überlegen Hörforscher, ob und wie solche aktiven Vibrationen den eintreffenden Schall verstärken könnten. Jetzt haben Biophysiker um Frank Jülicher vom Curie-Institut in Paris ein mathematisches Modell entwickelt, das die Eigenschaften des Gehörs und insbesondere die große dynamische Breite der Hörwahrnehmung sowie die beachtlichen Verstärker-Effekte elegant auf ein einziges Funktionsprinzip zurückführt (*Proc. Nat. Acad. Sciences, Bd. 97, S. 3183*). Demnach sollen die Hörzellen oder die Härchen permanent schwingen; die Vibrationen würden aber durch einen bislang unbekannten Mechanismus gedämpft. Mathematisch gesehen, befindet sich dieses dynamische System an einer so genannten Hopf-Verzweigung: Ein kleiner äußerer Einfluss, beispielsweise eine eintreffende Schallwelle, bewirkt einen abrupten Wechsel aus dem gedämpften Zustand in ungehinderte, aktive Oszillationen und intensiviert dadurch die Geräuschwahrnehmung.

Je nach ihrer Position im Hörorgan spricht jede Sinneszelle dabei nur auf eine bestimmte Frequenz an und verstärkt ausschließlich diesen Anteil des Schalls. Nach den Berechnungen der Pariser Wissenschaftler justiert ein zusätzlicher Mechanismus das ganze System automatisch genau auf den kritischen Verzweigungspunkt ein.

Beim Menschen haben Physiologen bisher lediglich die erwähnten Oszillationen der Haarzellen in einem elektrischen Wechselfeld entdeckt; spontane Schwingungen der Stereocilien ließen sich dagegen nicht beobachten. Härchen aus Froschohren führen jedoch, wie Pascal Martin und Jim Hudspeth von der Rockefeller-Universität in New York kürzlich herausfanden, auch ohne äußere Einflüsse permanente Bewegungen aus (*Proc. Nat. Acad. Sciences, Bd. 96, S. 14306*).

Die Haarzellen selbst sind bei Amphibien – wie auch bei Vögeln oder Fischen – starr und reagieren nicht wie die von Säugern auf elektrische Reize. Möglicherweise arbeiten bei Säugetieren beide Mechanismen – oszillierende Zellen und schwingende Härchen – zusammen. So ließe sich die enorme Leistungsfähigkeit des Gehörs von Säugern erklären, das im Tierreich unübertroffen ist.

Jülicher und seine Kollegen gehen davon aus, dass molekulare Motoren die aktiven Vibrationen im Innenohr hervorrufen. Inzwischen haben Peter Dallos und seine Kollegen von der Northwestern University in Evanston (Illinois) auch schon einen Kandidaten dafür aufgespürt. Es handelt sich um einen neuen Typ von Motorprotein. Er unterscheidet sich klar von den anderen bekannten Zell-Motoren wie dem Kinesin im Zellskelett, dem Myosin aus den Muskeln und dem Dynein, das bei der Bewegung der Geißeln und Wimpern von Einzellern eine Rolle spielt; anders als diese benötigt er nämlich keine chemische Energie in Form des zellulären Energielieferanten Adenosintriphosphat (ATP).

Um unbekannte Motorproteine in den Säugetier-Haarzellen zu identifizieren und näher zu charakterisieren, bedienten sich Dallos und seine Kollegen einer geschickten, aber aufwändigen Strategie (*Nature, Bd. 405, S. 149*). Sie isolierten je 1000 aktiv vibrierende und passive Haarzellen aus dem Innenohr einer Wüstenspringmaus und analysierten die beiden Zelltypen auf molekulare Unterschiede. In den vibrierenden fanden sie einige Proteine, die beim anderen Zelltyp fehlen. Gleich das erste davon, das sie näher untersuchten, erwies sich als Volltreffer. Zellen, in deren Membranen der Eiweißstoff sitzt, können bis zu 80000-mal pro Sekunde hin und her schwingen. Nach der in der Musik verwendeten Tempobezeichnung *presto* – schnell – nannten die Forscher das Protein deshalb Prestin.

Die Analyse seiner Aminosäuresequenz lieferte zwei bemerkenswerte Erkenntnisse. Zum einen ähnelt Prestin in seinem chemischen Aufbau einem weit verbreiteten Transporter-Protein, dem so genannten Pendrin. Zum anderen enthält es zwei Abschnitte, die unterschiedliche elektrische Ladungen tragen. Der positiv geladene Bereich liegt nur ein paar Aminosäuren neben dem negativ geladenen am einen Ende der Aminosäurekette. Die beiden Abschnitte könnten daher die Bewegung der Haarzellen hervorrufen, indem sie im Takt einer angelegten Wechselspannung hin- und herklappen. Da die Zellmembran wahrscheinlich dicht bepackt ist mit Prestin, würde die Haarzelle ihre Form verändern, wenn alle Moleküle gleichzeitig umspringen.

Um diese Vermutung zu überprüfen, bauten die Wissenschaftler das Prestin-Gen in kultivierte menschliche Nierenzellen ein, die sich normalerweise nicht rühren. Und tatsächlich: Beim Anlegen einer Wechselspannung fingen die manipulierten Nierenzellen unmittelbar an mit derselben Frequenz zu vibrieren. Für Dallos, der seit über dreißig Jahren das Gehör untersucht, ist das ein eindeutiger Beleg – auch wenn er noch keine Ahnung hat, wie im Ohr die nötigen Ladungsänderungen zu Stande kommen.

Antrieb für molekulare Maschinen?

Das neu entdeckte Motorprotein könnte auch technische Anwendungen finden. Vielleicht lässt es sich eines Tages als Antrieb für Maschinen im Molekül-Maßstab nutzen. Die anderen Motorproteine eignen sich dafür weniger, weil sie viel langsamer sind und chemische statt elektrischer Energie benötigen.

Doch solche nanotechnologischen Anwendungen will Dallos einstweilen anderen überlassen. Mit seinen Kollegen plant er derzeit Experimente, das Prestin-Gen in Mäusen gezielt auszuschalten. So wird sich zeigen, wie der Hörvorgang funktioniert, wenn der vermutete Verstärker-Effekt durch das Prestin wegfällt. Daneben wollen die Wissenschaftler die Struktur des Proteins genauer ermitteln, um so die Bestätigung für ihre Annahme zu finden, dass die Zellbewegung durch das Umschlagen der unterschiedlich geladenen Protein-Bereiche entsteht.

Außerdem bleibt zu klären, welche Aufgaben die übrigen Proteine haben, die in den bewegungslosen Haarzellen nicht vorkommen. Vielleicht helfen sie dem Prestin dabei, die spontanen Eigenschwingungen der Haarzellen von Säugern auszulösen. Sollten die kommenden Experimente die vermutete Rolle des Prestins nicht bestätigen, wäre auch das noch ein Fortschritt: Dann müsste man davon ausgehen, dass allein spontane Schwingungen der Härchen den Verstärkungseffekt hervorrufen. ■

Hanno Charisius *ist Biologe und lebt als freier Journalist in München.*

SEUCHENBEKÄMPFUNG

Neues Impfkonzept gegen Tropenseuche

Medikamentös lässt sich die Bilharziose nur durch regelmäßige Massentherapien bekämpfen, die aufwändig und teuer sind. Eine Alternative bietet ein neuartiger Impfstoff, der statt am Parasiten bei der Immunreaktion gegen dessen Eier ansetzt.

Von Hermann Feldmeier

Mindestens 200 Millionen Menschen in Afrika, Asien und Südamerika leiden an einer oder mehreren Formen der Bilharziose – einer Infektion durch so genannte Pärchenegel (Schistosomen). Die Seuche ist überall dort verbreitet, wo Menschen regelmäßig Hautkontakt mit offenen Gewässern haben und wegen schlechter hygienischer Verhältnisse Stuhl und Urin in Flüsse, Seen oder Kanäle gelangen, in denen spezielle Arten von Schnecken den Schistosomen als Zwischenwirte dienen (siehe Kasten rechts oben).

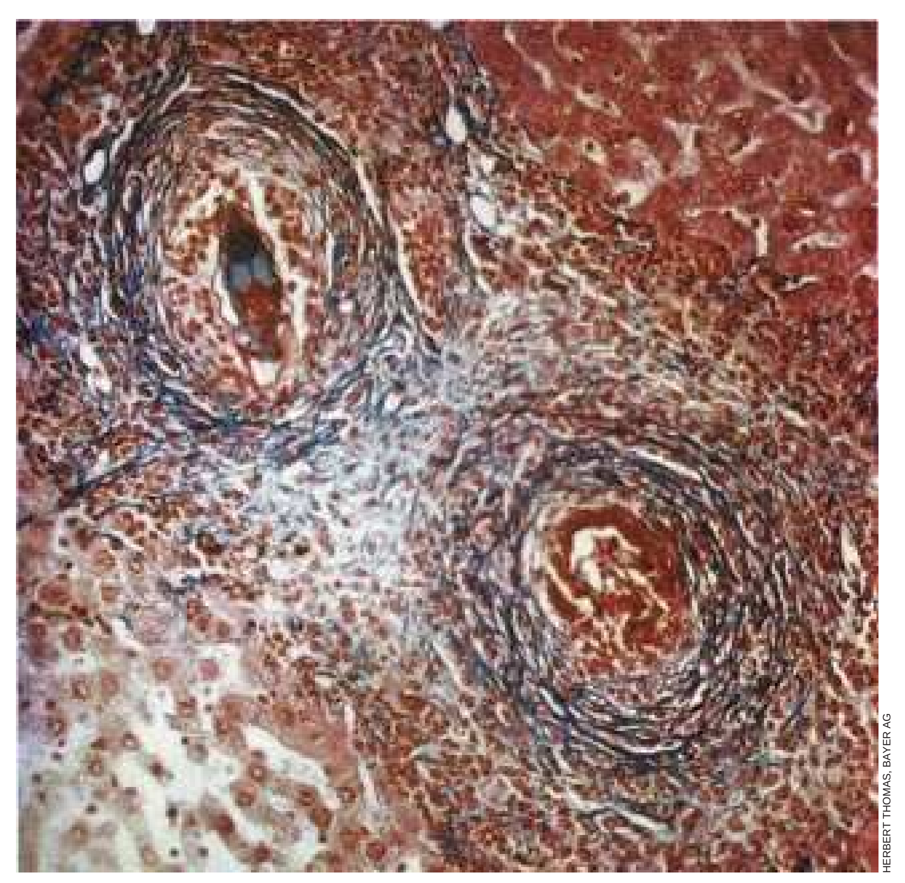
Die erwachsenen Würmer schmarotzen in der Endstrombahn der Beckenorgane – *Schistosoma haematobium* vorwiegend in den Venen der Blase und der Harnleiter, die anderen Arten primär in den Venen des Dickdarms. Sie leben dort in einem Zustand lebenslanger Kopulation. Die Weibchen produzieren mehrere Dutzend bis einige Hundert Eier pro Tag. Diese versuchen die Wand von Blase beziehungsweise Darm zu durchbohren, um dann passiv mit den Exkrementen den Körper zu verlassen. Etwa die Hälfte der Eier bleibt allerdings im Gewebe stecken oder wird mit dem Blutstrom in die Leber geschwemmt, wo sie die feinen Verästelungen der Pfortader verstopfen.

Während das Immunsystem den Wurmlarven wenig und den ausgewachsenen Parasiten gar nichts anhaben kann, erkennt es die etwa 0,05 mal 0,17 Millimeter großen Eier als Fremdkörper und schließt sie in einem so genannten Granulom ein (Bild unten). Dieser Abwehrversuch erfolgt allerdings am untauglichen Objekt und verursacht letztlich erst die Krankheitssymptome. Das Granulom verdrängt nämlich etwa das Hundertfache des Eivolumens an gesundem Gewebe und wird, wenn das abgekapselte Ei nach einigen Monaten abstirbt, durch eine bindegewebige Narbe ersetzt. Bei Personen mit einigen Hundert Wurmpaaren – im Endemiegebiet keine Seltenheit – entstehen so innerhalb weniger Jahre Millionen winziger Narben, die beispielsweise einen großen Teil des normalen Lebergewebes verdrängen. Schließlich werden Harnleiter, Blase oder Leber auf diese Weise fast völlig zerstört – Siechtum und Tod sind programmiert.

Zwar gibt es gegen die adulten Würmer ein wirksames Medikament, doch da sich die Menschen unter den herrschenden Verhältnissen immer wieder infizieren, müssen die Patienten – und sinnvollerweise häufig die gesamte Bevölkerung – Jahr für Jahr erneut behandelt werden. Regelmäßige Massentherapien üben jedoch unweigerlich einen Selektionsdruck auf die Parasitenpopulation aus – mit der Folge, dass über kurz oder lang resistente Mutanten entstehen. Eine Impfung hätte demgegenüber große Vorteile.

Allerdings ist es bisher nicht gelungen, einen Impfstoff zu entwickeln, der wirksam vor einer Infektion mit den Pärchenegeln schützt. Immerhin zeichnen sich nun jedoch Erfolge bei einer anderen, völlig neuartigen Immunisierungsstrategie ab. Sie richtet sich nicht gegen die ausgewachsenen Schmarotzer selbst, sondern gegen deren Eier oder genauer: gegen die überzogene Abwehrreaktion des Körpers diesen Eiern gegenüber.

Die Probleme mit der Impfung gegen Bilharziose haben vielfältige Gründe. So entwickelt sich eine schützende Immunität gegen Schistosomen beim Menschen nur sehr langsam – und ihre Effizienz ist mehr schlecht als recht. Zwar gelingt es dem Immunsystem nach 10 bis 15 Jahren



HERBERT THOMAS, BAYER AG

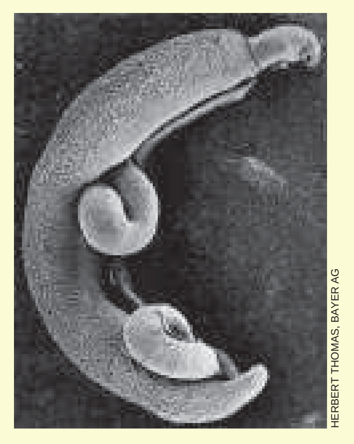
Für das chronische Stadium der Bilharziose sind nicht die Pärchenegel selbst, sondern ausschließlich ihre Eier verantwortlich. Sie bleiben teilweise im Gewebe stecken, wo sie heftige Entzündungen hervorrufen. Jedes Ei sitzt dann – wie dieser gefärbte Gewebeschnitt einer Leber zeigt – mitten in einem Mikroabszess, einem Granulom.

Infektionskreislauf der Pärchenegel

Ein tückischer Parasit

Die Bilharziose ist eine tropische Wurminfektion, die der deutsche Arzt Theodor Bilharz 1851 bei Obduktionen in einem Krankenhaus in Kairo entdeckt hat. Der Mensch infiziert sich beim Kontakt mit Wasser, das so genannte Gabelschwanzlarven enthält. Diese durchbohren in Minutenschnelle die Haut und begeben sich dann auf eine komplizierte Wanderung durch den Körper, während der sie ausreifen. Nach etwa sieben Wochen erreichen die erwachsenen getrennt geschlechtlichen Würmer, die zu den Egeln gehören, die Blutgefäße der Darmwand und der Blase und verankern sich mit ihren Saugnäpfen an deren Innenwänden.

Von nun an produzieren die weiblichen Parasiten jeden Tag Dutzende bis Hunderte von Eiern, die die Wand der feinen Blutgefäße durchbohren und so in Blase oder Darm gelangen. In Gegenden ohne ausreichende sanitäre Einrichtungen werden die Eier mit dem Urin oder Stuhl in Flüsse, Seen oder Bewässerungsgräben befördert. Die daraus schlüpfenden Larvenstadien dringen in Süßwasserschnecken ein, wo sie ihre ersten Entwicklungsstadien durchlaufen, bevor sie den Menschen befallen.



HERBERT THOMAS, BAYER AG

Das Egelmännchen umhüllt das Weibchen mit den Seitenlappen.

des „Lernens“, mehr und mehr junge, gerade in den Körper eingedrungene Schistosoma-Larven „abzufangen“, bevor sie zu reproduktionsreifen Würmern heranwachsen können; gegen die adulten Tiere, die bereits im Körper schmarotzen und eine Lebenserwartung von bis zu 30 Jahren haben, sind die Abwehrkräfte allerdings machtlos. Dieses Phänomen tritt in der vielfältigen Welt der Parasiten gar nicht so selten auf.

Bis heute ist nicht ganz klar, wie diese „Minimalimmunität“ zu Stande kommt. Tiermodelle, in denen man die komplexen Hintergründe analysieren könnte, stifteten bislang mehr Verwirrung als Einsicht: In so verwandten Tierarten wie Maus und Ratte wurden völlig konträre Mechanismen identifiziert. Einzig eine seltene afrikanische Affenspezies (*Erythrocebus patas*) hat sich bislang als ein Modell erwiesen, aus dem man Schlussfolgerungen für die Situation beim Menschen ziehen kann.

Jedenfalls sind die Schistosomen in der Lage, bestimmte Komponenten des Immunsystems in ihrem Sinne zu „manipulieren“. Dadurch werden zum Beispiel wirklich Schutz gewährende Mechanismen unterdrückt und stattdessen Subpopulationen von weißen Blutkörperchen (*T*-Lymphocyten) aktiviert, die gegen Schistosomen nichts ausrichten können. Diese „Immunmodulation“ hat unter anderem zur Folge, dass Bilharziosepatienten mit gewissen Virusinfektionen nicht – oder nur verzögert – fertig werden.

Ein wie immer gearteter Impfstoff müsste also deutlich mehr schaffen, als die Natur selbst leistet. Dass dies schwierig ist, zeigen 30 Jahre bislang weitgehend vergeblicher Bemühungen um die Entwicklung einer Bilharziose-Vakzine für Menschen.

Lässt sich schon kein zuverlässiger Impfstoff entwickeln, der die Infektion mit dem Pärchenegel selbst unterbindet, dann wäre einer, der vom Ei ausgelöste Krankheitsfolgen verhindert oder mindert, bereits ein Fortschritt. Zwei Wege für eine solche Anti-Krankheits-Vakzine wurden in jüngster Zeit beschritten – mit ersten Erfolgen.

Ein Konzept zielt darauf ab, die Bildung der Eigranulome zu verhindern oder deren Volumen zu verkleinern. Das Entstehen der Granulome wird über Botenstoffe gesteuert (in der Maus zum Beispiel die Interleukine IL-4, IL-10 und IL-13), für deren Freisetzung bestimmte Antigene des Parasiten sorgen. Die Idee ist nun, durch Impfung mit modifizierten Antigenen die Immunreaktion so abzuwandeln, dass vorwiegend entzündungshemmend wirkende Botenstoffe wie IL-12 entstehen, die mäßigend auf die Bildung von Granulomen einwirken. Die Realisierung der Idee ist freilich nicht über erste Versuche hinausgekommen.

Immunisierung drosselt Eiproduktion

Bereits weiter fortgeschritten ist der zweite Ansatz: die Entwicklung einer Vakzine, welche die Fertilität der weiblichen Würmer einschränkt. Dieser Taktik liegt die Überlegung zu Grunde, dass umso weniger Granulome und damit Narben in lebenswichtigen Organen entstehen, je weniger Eier die weiblichen Pärchenegel produzieren.

Als Schlüsselmolekül hat sich hierbei das Enzym Glutathion-S-Transferase (GST) herauskristallisiert, das für die Fortpflanzung der Parasiten essenziell ist. Jede Schistosomenspezies verfügt über eine charakteristische Variante dieses Enzyms. Die GSTs von *S. haematobium* und *S. mansoni* lassen sich bereits in gentechnisch veränderten Bakterien in großen Mengen herstellen. Tatsächlich ruft eine Immunisierung mit GST eine deutlich stärkere Abwehrreaktion hervor als eine natürliche Infektion.

Die Gruppe um André Capron am Institut Pasteur in Lille hat seit einigen Jahren systematisch ausgelotet, wie das in Bakterien klonierte Enzym am effizientesten als Vakzine wirkt. Wie üblich zeigte sich, dass die Wahl eines Adjuvans – eines die Immunisierung fördernden, aber selbst nicht als Antigen wirkenden Hilfsstoffes – eine große Rolle spielt. Je nach Tiermodell ließ sich die Eiproduktion um 50 bis 80 Prozent reduzieren. Im gleichen Maße verringerten sich auch die Schäden, welche die Eier in Blase, Harnleiter oder Leber anrichten.

In so genannten Phase-I-Studien hat sich bereits erwiesen, dass die GST-Vakzine gegen *S. haematobium* frei von unerwünschten Nebenwirkungen bei gesunden Personen ist. Seit dem Sommer letzten Jahres läuft auch eine erste Phase-II-Studie im Senegal, die den Wirksamkeitsnachweis unter realistischen Bedingungen erbringen soll. Die Ergebnisse, die frühestens in zwei Jahren vorliegen dürften, werden von der Fachwelt mit Spannung erwartet. Schließlich handelt es sich nicht nur um die erste Vakzine gegen einen vielzelligen Parasiten beim Menschen, sondern zugleich um eine völlig neue Kategorie von Impfstoffen – sind doch alle bislang entwickelten Vakzinen dafür gedacht, das Eindringen von Krankheitserregern zu verhindern, ihre Vermehrung zu bremsen oder die freigesetzten Giftstoffe zu neutralisieren. Wenn sich der neue Ansatz bewährt, könnte er auch gegen andere Parasiten bessere Bekämpfungsmöglichkeiten eröffnen. ■

Prof. Dr. med. Hermann Feldmeier *lehrt an der Freien Universität Berlin Tropenmedizin.*

(Seiten 18 bis 21: Anzeige und Beihefter)

NACHGEHAKT

Die unerträgliche Gleichartigkeit des Scheins

Es war ein Schmetterlingseffekt der besonderen Art, mit kleinen Papierzipfeln in unvollständig gelochten Stimmzetteln anstelle der Schmetterlingsflügel. Aber der Effekt war in der Tat erheblich, und „Chaos“ ist ein angemessenes Wort für den Ausgang der letzten amerikanischen Präsidentschaftswahl (der noch unklar ist, während diese Zeilen in Druck gehen).

Eigentlich ist es nichts weiter als eine Messung, nämlich des Volkswillens. Aber auf eine Messgenauigkeit von 10^{-6} (wenige hundert unter mehr als 100 Millionen Wählern) war das politische System verständlicherweise nicht vorbereitet.

Ist ein derart knapper Ausgang ein historischer Zufall ohne tiefere Bedeutung, oder musste es irgendwann so kommen? Gibt es Tendenzen, die ein Kopf-an-Kopf-Rennen begünstigen?

Das amerikanische Wahlmännersystem ist nicht verantwortlich, im Gegenteil: Von seiner Idee her ist es darauf ausgelegt, kleine Unterschiede zu vergröbern, indem die entscheidenden Stimmen nur in Blöcken einer gewissen Mindestgröße, nämlich bundesstaatenweise, vergeben werden. Die deutsche Fünfprozentklausel verfolgt mit anderen Mitteln denselben Zweck: klare Verhältnisse zu schaffen, selbst wenn der Wille des Volkes so klar nicht ist.

Gore-Eis oder Bush-Eis – wo ist der Unterschied?

Begeben wir uns zur besseren Übersicht auf einen abstrakteren Standpunkt. Betrachten wir ausschließlich die Situation im Staate Florida und vernachlässigen wir die vielen chancenlosen Kandidaten. Es bleiben zwei Einzelpersonen, die jeder unter Einsatz beträchtlicher Mittel möglichst viele „Kunden“ für sich zu gewinnen suchen.

Noch ein bisschen mehr – nicht unbedingt realitätsferne – Abstraktion, und man landet beim berüchtigten Problem der Eisverkäufer am Strand, das Harold Hotelling 1929 in die Wirtschaftswissenschaften eingeführt hat. Der Strand ist eine Meile lang und gleichmäßig dicht mit Sonnenhungrigen bevölkert. Irgendwo stehen zwei Eisverkäufer mit ihren Wagen. Beide haben genau dasselbe zum gleichen Preis anzubieten, also läuft jeder Kunde zu dem Verkäufer, der ihm näher steht. Welches sind die optimalen Standorte für die Eiswagen?

Der erste Gedanke ist: bei einem Viertel und drei Vierteln der Strandlänge. Dann hat nämlich jeder Kunde höchstens eine Viertelmeile und der Durchschnittskunde nur eine Achtelmeile zu laufen. Die „Wasserscheide“, also der Punkt, der die Einzugsgebiete beider Verkäufer trennt, liegt genau in der Strandmitte.

Leider ist diese Lösung sozialistisch: gut für das (eisessende) Volk, aber nur durch Dekret durchsetzbar, denn sie ist nicht stabil unter dem freien Spiel der Marktkräfte. Einer der Verkäufer hat einen guten Grund, seinen Wagen ein Stück Richtung Strandmitte zu schieben, denn dadurch verrückt er die Wasserscheide ein Stück zu seinen Gunsten, ohne an seinem Ende des Strandes Kunden zu verlieren: Die müssen zwar ein wenig weiter laufen, haben aber keinen Anlass, zur Konkurrenz zu wechseln. Für den anderen Verkäufer gilt genau dasselbe, denn die Situation ist völlig symmetrisch. Also rücken sie beide unaufhaltsam aufeinander zu, bis sie sich in der Mitte treffen.

Das ist schlecht für die Eisesser, die jetzt den doppelten Weg zurückzulegen haben, sowohl im Mittel als auch im Extremfall, und nicht besonders gut für die Verkäufer, denn sie haben genau denselben Marktanteil, wie wenn sie auf ihren sozialistischen Plätzen stehen geblieben wären. Schlimmer noch: Der Umsatz sinkt, denn einigen Leuten vom äußersten Ende des Strandes ist der weite Weg zu dumm geworden. Gleichwohl rücken die Verkäufer nicht voneinander ab, denn sie stecken in einer Falle, die als Nash-Gleichgewicht in die Wirtschaftstheorie eingegangen ist: Die Lage ist nicht unbedingt optimal, aber stabil, weil jeder, der sich alleine bewegt, sich dadurch verschlechtern würde. Heraushelfen könnte allenfalls vertrauensvolle Kooperation, womit man beim nicht minder berüchtigten Gefangenendilemma wäre (Spektrum der Wissenschaft Digest 1/1998 „Kooperation und Konkurrenz“).

In seinem Buch „Synergetik“ vergleicht Hermann Haken den Strand mit dem Spektrum der politischen Positionen, sagen wir von links bis rechts. Demnach haben die Kandidaten, die sich zur Wahl stellen, wie die Eisverkäufer eigentlich alle dasselbe anzubieten, oder zumindest ist für den Wähler kein wesentlicher Unterschied erkennbar. Jeder „Kunde“ wählt den Kandidaten, der seiner eigenen Position am nächsten steht; das wissen die Kandidaten und nehmen ungeachtet ihrer eigenen Überzeugung die Position ein, die ihnen am meisten Stimmen einbringt. Da sie dabei das Verhalten des Konkurrenten genau beobachten, landen sie irgendwann beide völlig ununterscheidbar in der Mitte. So sehen das die Wähler auch und verteilen ihre Stimmen zu gleichen Teilen auf beide Kandidaten – so präzise, dass kleine Abweichungen unmäßig große Folgen haben.

Die Situation ändert sich nicht wesentlich, wenn – wie üblich – der „Strand“ nicht gleichmäßig bevölkert, sondern die Mitte des politischen Spektrums stärker besetzt ist als die Extreme; es verschärft sich nur der Drang zur Mitte. Anders wird es erst, wenn die Bevölkerung in zwei Lager mit einer kamelhöckerartigen Dichteverteilung gespalten ist.

Natürlich gibt es jede Menge Einwände gegen diesen Vergleich. Das politische Spektrum ist nicht so eindimensional wie der Strand, die Persönlichkeit eines Politikers spielt vielleicht doch eine Rolle, und schließlich geht nicht jede Wahl so knapp aus. Schon recht – man soll eine mathematische Abstraktion nicht über ihren Gültigkeitsbereich hinaustreiben. Wenn dabei Unfug herauskommt, liegt das nicht unbedingt an der Abstraktion.

Immerhin hilft sie einen Aspekt der deutschen Situation in einem neuen Licht zu sehen. Nehmen wir an, ein Start-Up-Unternehmer sieht die vielen potenziellen Kunden am Rande des Strandes, die wegen des weiten Wegs auf das Eis verzichten, und schnappt mit einem neuen Eiswagen vom Rand her den Etablierten die Kunden weg. Da rückt doch lieber einer von ihnen aus seiner Mitte-Position nach außen, als den Neuen hochkommen zu lassen. Oder wie Edmund Stoiber kürzlich sagte: „Es darf keine Volkspartei rechts von der Union geben.“

Christoph Pöppe



Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

OPTIK

Mikroskopie mit einem Molekül als Lichtquelle

Wissenschaftler an der Universität Konstanz konnten erstmals ein Objekt abbilden, indem sie es mit nur einem einzigen fluoreszierenden Molekül beleuchteten. Das Verfahren verspricht Auflösungen für Lichtmikroskope bis fast in den atomaren Bereich.

Von Jens Michaelis, Christian Hettich und Jan Zitzmann

Sehen heißt verstehen" – diese Redewendung illustriert den engen Zusammenhang zwischen der optischen Wahrnehmung und dem menschlichen Denken. Kein anderes Sinnesorgan liefert mehr Informationen in kürzerer Zeit als das Auge, erfasst es doch drei Raumdimensionen und Farbe auf einmal. Aber auch das Gehirn ist in hohem Maße auf die Verarbeitung optischer Reize konditioniert. So verwundert es nicht, dass in der Wissenschaft abbildende Verfahren einen enormen Beitrag zum Erkenntnisfortschritt geleistet haben und immer noch leisten.

Auf dem Weg zur Erforschung der Welt des Kleinen bildete beispielsweise die Erfindung des Mikroskops durch Antony van Leeuvenhoek im Jahre 1683 einen wichtigen Meilenstein (Spektrum der Wissenschaft 6/98, S. 68). Seit damals konnte die Leistungsfähigkeit dieses Instruments immer weiter verbessert werden, sodass es auch heute noch enorme Bedeutung hat.

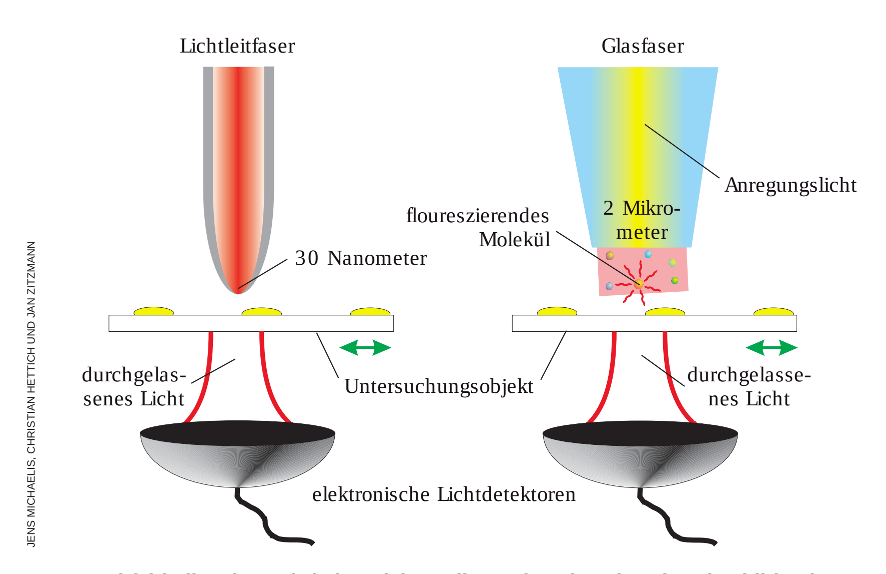
Wie Ernst Abbé 1874 herausfand, lässt sich durch Verbesserung der optischen Qualität die Auflösung von Mikroskopen allerdings nicht beliebig steigern. Linsen können einen Lichtstrahl nur auf eine Größe fokussieren, die etwa der Wellenlänge des Lichtes entspricht – typischerweise rund 500 Nanometer; kleinere Details lassen sich deshalb nicht damit auflösen. Man muss jedoch zwischen „noch sehen" und „auflösen" unterscheiden. Eine Punktlichtquelle mit einem Durchmesser von einem Nanometer – etwa ein leuchtendes Molekül – kann man mit einem Mikroskop durchaus sehen, wenn sie nur hell genug ist. Dem Auflösungsvermögen sind dagegen physikalische Grenzen gesetzt: Zwei benachbarte leuchtende Moleküle erscheinen nur dann als getrennte Punkte, wenn sie weiter als etwa eine halbe Wellenlänge voneinander entfernt sind.

Zur Untersuchung von noch feineren Strukturen wurden deshalb zunächst andere Arten der Mikroskopie entwickelt, insbesondere die Elektronen- oder die Kraftmikroskopie. Damit kann man bestimmte Eigenschaften einer Probe untersuchen – etwa ihre elektrische Leitfähigkeit oder Rauigkeit. Die optischen Eigenschaften eines Objektes wie Farbe oder Opazität bleiben dagegen verborgen. Gerade darin stecken jedoch wichtige zusätzliche Informationen, die Aufschluss über die Materialeigenschaften geben.

Im Jahre 1984 stellten Dieter Pohl, Wilfried Denk und M. Lanz am Forschungslaboratorium der Firma IBM in Rüschlikon (Schweiz) eine Methode vor, die auch optische Informationen mit hoher Auflösung liefert. Dabei beleuchtet man eine Probe mit einer Lichtquelle, die sehr viel kleiner ist als die Wellenlänge des von ihr ausgesandten Lichts, aus einer Entfernung von weniger als der Lichtwellenlänge (Spektrum der Wissenschaft 11/97, S. 27). Es heißt, die Probe befinde sich im Nahfeld der Lichtquelle. Die Analyse der durchgelassenen Photonen gibt dann Aufschluss über die lokalen optischen Eigenschaften des Untersuchungsobjekts.

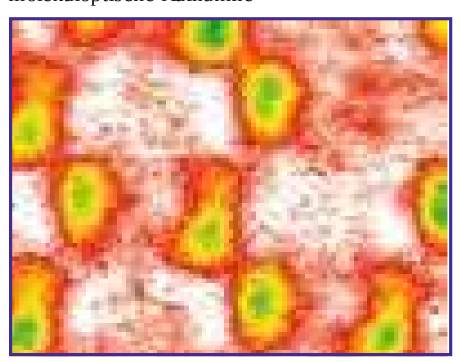
Wie klein der betrachtete Bereich ist, hängt nur vom Durchmesser der Lichtquelle und von ihrem Abstand zur Probe ab. Bewegt man das Untersuchungsobjekt in kleinen Schritten unter der Lichtquelle vorbei und nimmt jeweils das Signal auf, so kann man Punkt für Punkt ein Bild zusammensetzen. Dabei agiert die Lichtquelle gleichsam als Sonde. Entsprechend heißt diese Methode optische Rastersondenmikroskopie oder SNOM (nach englisch: *Scanning Near-field Optical Microscopy*).

Zur Entwicklung eines hochauflösenden optischen Nahfeldmikroskops benötigt man zunächst eine Nano-Lichtquelle mit entsprechend kleinen Abmessungen. Meist dient dafür eine Glasfaser, in deren eines Ende Licht eingekoppelt wird, sodass das andere Ende als leuchtende Sonde dient. Um die Austrittsfläche des Lichts möglichst klein zu halten, spitzt man die Glasfaser an und überzieht sie mit einem Metallfilm, der an der Spitze ein kleines Loch hat. Der Durchmesser dieser Öffnung bestimmt die Größe der ▶



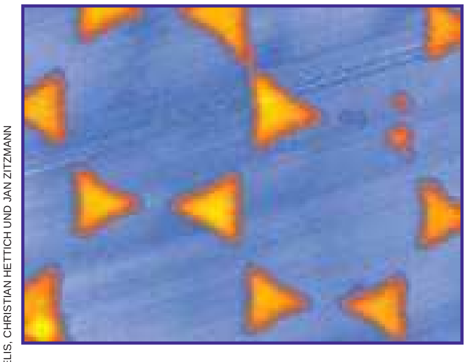
Im Nahfeldmikroskop wird eine Lichtquelle punktweise über das abzubildende Objekt geführt; je geringer ihr Durchmesser und ihr Abstand vom Objekt, desto besser ist die Auflösung. Üblicherweise wird die Probe durch eine mit Metall beschichtete Glasfaserspitze beleuchtet (links). Eine noch kleinere Lichtquelle erhält man jedoch, wenn man ein einzelnes fluoreszierendes Molekül in einem Trägerkristall auf einem Glasfaserende selektiv zum Leuchten bringt, indem man es bei sehr tiefer Temperatur mit Laserlicht passender Frequenz bestrahlt (rechts).

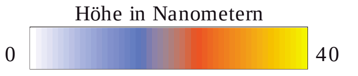
moleküloptische Aufnahme





rasterkraftmikroskopische Aufnahme





JENS MICHAELIS, CHRISTIAN HETTICH UND JAN ZITZMANN

Die Abbildung von Metalldreiecken auf Glas mit dem Einzelmolekül-Nahfeldmikroskop (oben) zeigt die Intensität des durchgelassenen Fluoreszenzlichts. Dagegen liefert die Rasterkraftmikroskop-Aufnahme (unten) Informationen über die Höhe der Dreiecke. Die Messwerte sind jeweils farblich kodiert. Die optische Aufnahme hat eine relativ geringe Auflösung, weil sich das zufällig ausgewählte fluoreszierende Farbstoffmolekül offenbar tief im Inneren des Trägerkristalls und somit nicht in unmittelbarer Nähe der abzubildenden Strukturen befand.

Lichtquelle. Mit Techniken, die von anderen hochauflösenden Rastersondenmethoden bekannt sind, bringt man die Faserspitze sehr nahe an eine Probe heran und behält diesen Abstand während des Abrasterns bei.

Mit einem solchen Mikroskop lassen sich typischerweise 50 bis 100 Nanometer große Details abbilden. Eine noch höhere Auflösung scheitert daran, dass dünne Metallfilme Licht zwar weitgehend, aber nicht vollständig blockieren. Man erinnere sich nur an die Schutzbrillen zur Beobachtung der Sonnenfinsternis vor eineinhalb Jahren, durch deren metallische Folie die Sonnenscheibe gut zu erkennen war. Da der Metallfilm rund um eine SNOM-Spitze sehr dünn ist, sind die Ränder des Lochs nicht scharf, sodass es effektiv größer wirkt. Die kleinsten realisierbaren effektiven Lochdurchmesser betragen etwa 30 Nanometer.

In der Nanooptik-Gruppe von Vahid Sandoghdar am Lehrstuhl von Jürgen Mlynek an der Universität Konstanz wollten wir uns damit nicht zufrieden geben. Wir machten uns deshalb auf die Suche nach noch kleineren Lichtquellen.

Im Prinzip bieten sich einzelne Moleküle an – schließlich haben sie Durchmesser von nur etwa einem Nanometer. Tatsächlich konnten wir demonstrieren, dass eine Beleuchtung mit einem einzigen Molekül realisierbar ist (*Nature, Bd. 405, S. 325*). Damit eröffnet sich die Möglichkeit, erstmals Details optisch abzubilden, die annähernd atomare Dimensionen erreichen.

Wie kann man ein isoliertes Molekül zum Leuchten bringen? Die Antwort heißt Fluoreszenz: Die Moleküle bestimmter Farbstoffe lassen sich mit energiereichem Licht anregen und strahlen dieses dann bei etwas größeren Wellenlängen wieder ab. Durch einen Filter kann man das schwache Fluoreszenz- vom Anregungslicht trennen.

Um nun ein einzelnes fluoreszierendes Molekül gleichmäßig im Abstand von wenigen Nanometern über eine Probe zu führen, muss man es vorher fixieren. Dazu baut man es in einen Trägerkristall ein. Allerdings existiert kein Verfahren, mit dem sich genau ein Farbstoffmolekül in einem Träger unterbringen ließe; stets gelangen mindestens einige Tausend in einen wenige Mikrometer großen Kristall. Zum Leuchten angeregt werden darf aber nur eines davon. Wie ist das möglich?

Glücklicherweise bietet die Natur eine elegante Lösung. Die Farbstoffmoleküle im Kristall befinden sich alle in einer leicht unterschiedlichen atomaren Umgebung, sodass auch ihre Anregungsfrequenzen geringfügig differieren. Bei Raumtemperatur verwischen die starken Wärmebewegungen im Kristall normalerweise diese Unterschiede. Kühlt man aber auf –271 Grad Celsius ab und regt die Fluoreszenz mit einem Laser passender Frequenz an, lässt sich gezielt nur jeweils ein Molekül zum Leuchten bringen. Auf diese Weise erhält man eine Einzelmolekül-Lichtquelle; das haben schon vor über zehn Jahren die Gruppen von William E. Moerner am Almaden-Forschungszentrum der Firma IBM in San Jose (Kalifornien) – inzwischen ist Moerner an der Stanford-Universität (Kalifornien) – und von Michele Orrit am Centre de Physique Moleculaire Optique et Hertzienne in Bordeaux gezeigt.

Um diese Lichtquelle als Rastersonde einzusetzen, klebten wir den nur zwei Mikrometer großen Trägerkristall auf die Spitze einer herkömmlichen Glasfaser, die das Anregungslicht lieferte. So konnten wir ihn mitsamt dem fluoreszierenden Molekül gezielt positionieren. Dann mussten wir die Sonde nur noch in einer Apparatur unterbringen, die sich tief genug abkühlen ließ.

Eine erste Aufnahme mit dieser neuen Art der Mikroskopie ist im nebenstehenden Bild gezeigt. Als Probe diente eine Glasplatte, auf der kleine Aluminiumdreiecke sitzen. Zum Vergleich ist auch eine Rasterkraftaufnahme desselben Objekts wiedergegeben. Der Unterschied fällt unmittelbar ins Auge: Während die Rasterkraftaufnahme die Höhe der Aluminiumdreiecke darstellt, zeigt das optische Bild ihre lokale Durchlässigkeit für Licht einer bestimmten Frequenz. Beide Methoden liefern also völlig andere, sich ergänzende Informationen.

Optische Abbildung von Molekülen?

Was die Auflösung der Aufnahme angeht, bleibt sie mit rund 200 Nanometern allerdings noch weit hinter den Erwartungen zurück. Das hat einen einfachen Grund. Wie schon erwähnt, hängt die erreichbare Auflösung nicht nur von der Größe der Lichtquelle, sondern auch von deren Abstand zur Probe ab. Zwar lässt sich der Trägerkristall sehr nahe an die Glasoberfläche bringen, die Position der Moleküle im Kristall ist jedoch nicht genau bekannt. Die zufällig ausgewählte Lichtquelle kann sich also auch tief im Innern des Trägers befinden und somit nicht nah genug an der Probe sitzen. Das war bei unserem Experiment offenbar der Fall. Unsere weiteren Anstrengungen gehen nun dahin, gezielt Moleküle anzusprechen, die am äußeren Ende des Kristalls sitzen.

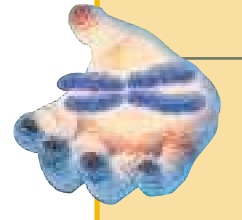
Ein weiteres Ziel ist, Fluoreszenzfarbstoffe zu finden, die sich auch bei Raumtemperatur als Einzelmolekül-Lichtquelle eignen. Nur unter dieser Voraussetzung lässt sich die optische Nahfeldmikroskopie für Untersuchungen im Bereich der Medizin und Biologie nutzen. Ein Nachteil der bisher bekannten Fluoreszenzfarbstoffe ist auch, dass sie an der Luft nach ein paar Minuten mit Sauerstoff reagieren. Dabei erlischt die

Fluoreszenz, und der Farbstoff bleicht aus. Zur Zeit bemühen sich viele Wissenschaftler aus der Chemie und anderen Fachbereichen, neue Moleküle zu synthetisieren, die auch bei Raumtemperatur an der Luft längere Zeit leuchten.

Sind diese Probleme erst überwunden, dürfte es gelingen, Strukturen bis hinab zu molekularen Dimensionen optisch abzubilden. Biologen hätten dann ein fantastisches neues Werkzeug in der Hand, um etwa die Funktionsweise einzelner Zellbestandteile zu untersuchen. Aber auch Chemiker dürften von der Möglichkeit angetan sein, nanometergenau hinzusehen. Für sie könnte sich mit der Nanofotochemie ein völlig neues Arbeitsgebiet eröffnen. ■

__Dr. Jens Michaelis__ hat in der Nanooptikgruppe an der Universität Konstanz promoviert, in der __Christian Hettich__ als Doktorand arbeitet. __Jan Zitzmann__ führt als Nachfolger von Michaelis dessen Arbeiten fort.

Serie: Die Botschaft des Genoms (Teil IV)



Anlässlich der Entschlüsselung des menschlichen Erbguts stellen wir zwölf darin codierte Proteine in einer Serie beispielhaft vor.

Insulin
Hüter des Zuckerhaushalts



__Michael Groß__ ist Biochemiker in Oxford (England)

GRAFIK: JEFF JOHNSON

Von den vielen Erkrankungen, die durch Ausfall eines einzelnen Proteins ausgelöst werden können, ist die Zuckerkrankheit (Diabetes mellitus) wohl eine der häufigsten und am besten bekannten. Noch bis vor 80 Jahren war Diabetes unheilbar und verlief allzu oft tödlich, weil man seine Ursache nicht verstand. Dann machten die Kanadier Frederick Banting und Charles Best die mit dem Medizin-Nobelpreis 1923 gewürdigte Entdeckung, dass ein besonders schwierig zu gewinnender Extrakt bestimmter Zellen der Bauchspeicheldrüse einen Wirkstoff gegen diese Erkrankung enthielt. Damit wurde erstmals ein Protein zum Medikament: das Hormon Insulin. Es erhielt seinen Namen von der Gewebestruktur, in der es produziert wird: den Langerhansschen Inseln.

Wegen dieser frühen Entdeckung, aber auch aus praktischen Gründen wie dem geringen Molekulargewicht wurde Insulin bald zu einem der bestuntersuchten Eiweißstoffe. An ihm bestimmte Frederick Sanger Anfang der fünfziger Jahre erstmals die Aminosäuresequenz eines Proteins. Sie zeigte, dass es aus zwei Ketten (*A* und *B*) besteht, die allerdings aus einem einzelnen Genprodukt durch Abtrennen eines Signalabschnitts und Herausschneiden eines weiteren Teils, des *C*-Peptids, entstehen. Die beiden Ketten werden nur durch zwei chemische Querverbindungen, so genannte Disulfidbrücken, zusammengehalten.

Insulin ist ein Hormon, also ein Signalstoff, der alle Zellen anspricht, die eine geeignete „Antenne“, das heißt einen Insulinrezeptor, aufweisen. Es überbringt die Nachricht, dass genügend Kohlenhydrate (Zucker, Stärke und ähnliche Moleküle) vorhanden sind, die aus dem Blutstrom in die Nahrungsspeicher etwa der Leberzellen überführt werden sollten. Die umgekehrte Reaktion, der Abbau von Speicherstoffen zur Freisetzung von Zucker, wird vom Insulin gehemmt.

Ist das Hormon einmal im Umlauf, bleiben ihm nur wenige Minuten, seine Aufgabe zu erfüllen. Da seine Anwesenheit im Blutstrom eine Botschaft darstellt, die nur zu einer bestimmten Zeit gültig ist, muss es schnell wieder abgebaut werden. Dazu genügt es, dass ein spezielles Enzym die beiden Ketten voneinander trennt. Da das herausgeschnittene *C*-Peptid einen Teil der für die Faltung benötigten Information enthält, können einmal getrennte *A*- und *B*-Ketten sich nicht wieder zu aktivem Insulin vereinigen, sondern werden wie andere defekte Proteine in der Leber zerlegt.

Bei Diabetikern unterbleibt die natürliche Insulinausschüttung nach Nahrungsaufnahme entweder völlig (beim Typ-I- oder juvenilen Diabetes) oder ist stark abgeschwächt (beim Typ-II- oder Altersdiabetes). Beim Typ-II-Diabetes ist außerdem die Empfindlichkeit der Insulinrezeptoren beeinträchtigt. Die genauen Ursachen dieser (häufigeren) Art der Zuckerkrankheit sind noch ungeklärt. Der juvenile Diabetes beruht dagegen auf der Vernichtung der Langerhansschen Inseln durch eine Autoimmunreaktion.

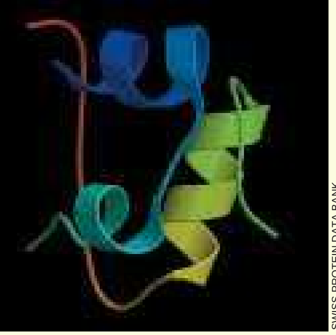
Das menschliche Insulin ist dem der anderen Säugetiere sehr ähnlich. Vom Schweine-Insulin unterscheidet es sich zum Beispiel nur in einer einzigen Aminosäure; deshalb kann Insulinmangel meist mit dem Schweinehormon behandelt werden. Um jedoch auch die sehr seltenen Unverträglichkeiten dieses Ersatzstoffs auszuschließen, verwendet man heute meist menschliches Insulin, das in genmanipulierten Bakterien erzeugt wird.

Die richtige Dosierung des Hormons, das durch intravenöse Injektion per Spritze verabreicht werden muss, ist allerdings schwierig. Kleinere Fehler über Jahre können Nebenwirkungen bis hin zur Erblindung haben und größere unmittelbare (lebens)gefährliche Komplikationen hervorrufen. Außerdem ist das Spritzen des Hormons nach jeder Mahlzeit lästig. Deshalb zielen neuere Entwicklungen bei den gentechnisch erzeugten Insulin-Varianten darauf ab, durch Austausch einzelner Aminosäuren den zeitlichen Verlauf der Wirkung zu steuern. So gibt es bereits besonders schnell wirksame Insulin-Analoga, aber auch langsam und langanhaltend wirkende, die entsprechend verzögert abgebaut werden.

Michael Groß

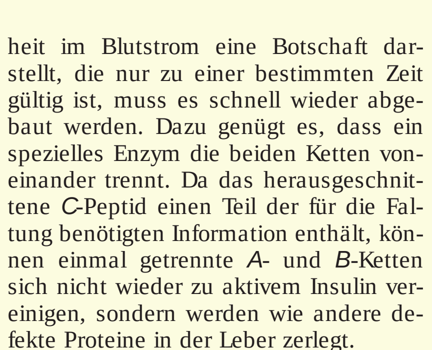
Steckbrief

- Molekulargewicht: 5734
- Aminosäuren: 51
- zwei Ketten
- Hormon
- Chromosom Nr.11



SWISS PROTEIN DATA BANK

Insulin besteht aus zwei Aminosäureketten, die durch zwei Disulfidbrücken (nicht gezeigt) miteinander verbunden sind.



BOTANIK

Manche mögen's warm

Lassen sich Pflanzen gentechnisch an den globalen Temperaturanstieg anpassen? Japanischen Forschern gelang es, wärmeresistenten Tabak zu erzeugen.

Von Wolfgang Hachtel und Silvia Berger

Die meisten Pflanzen vertragen Temperaturen über 35 Grad Celsius schlecht. In der Hitze können sie nur noch eingeschränkt Photosynthese betreiben, also mittels Lichtenergie aus Wasser und Kohlendioxid (CO_2) jene Zuckermoleküle herstellen, die sie zum Wachsen brauchen. Die Ursachen der Photosynthese-Hemmung, die auch bei gut an Wärme angepassten Arten heißer Standorte spätestens ab 40 Grad Celsius einsetzt, waren bisher unklar. Die meisten Wissenschaftler glaubten, dass die pflanzliche Atmung (Photorespiration) in der Hitze zunimmt oder die Aktivität der CO_2-fixierenden Enzyme sinkt. Nun aber zeigte sich, dass der Temperaturanstieg die so genannte Thylakoidmembran in den Chloroplasten beeinträchtigt – jene zellinterne Struktur, an der entscheidende Schritte der Photosynthese stattfinden. Zugleich gelang es, Tabakpflanzen genetisch so zu verändern, dass sie auch in der Hitze noch gut gedeihen. Damit zeichnet sich eine Möglichkeit ab, Nutzpflanzen für die drohende Erderwärmung fit zu machen.

Biomembranen bestehen aus einer Lipid-Doppelschicht mit Fettsäureschwänzen, die nach innen gerichtet sind, und Kopfgruppen, die zur wässrigen Umgebung nach außen zeigen. Die Thylakoidmembran hat dabei eine auffällige Besonderheit: Sie enthält ausnehmend viele ungesättigte Fettsäuren mit mehreren Doppelbindungen. Das macht sie relativ flüssig (aus demselben Grund ist mehrfach ungesättigtes Keimöl flüssiger als Margarine, die aus einfach ungesättigten oder gesättigten Fettsäuren besteht). Diese Besonderheit hängt vermutlich mit der Aufgabe der Thylakoidmembran zusammen. Sie fungiert gleichsam als Kraftwerk, das die chemische Energie für den Aufbau der Zuckermoleküle bei der Photosynthese bereitstellt. Dazu enthält sie eine Art Turbine namens ATP-Synthase, die von hindurchströmenden Protonen in Rotation versetzt wird und dabei den Energieträger Adenosintriphosphat (ATP) erzeugt. Sie muss daher flüssig genug sein, um die Drehung der ATP-Synthase zu erlauben, trotzdem aber fest genug, um dem Druck der Protonen zu widerstehen, die zuvor mittels Sonnenenergie auf die eine Seite der Membran gepumpt wurden.

Demnach könnte die Photosynthese bei hohen Temperaturen darunter leiden, dass die Lipid-Doppelschicht in der Wärme allzu sehr erweicht. Dafür sprechen unter anderem die Ergebnisse neuerer Untersuchungen, die Nicolai G. Bukhov vom Institut für Pflanzenphysiologie in Moskau zusammen mit Christian Wiese und Ulrich Heber von der Universität Würzburg durchgeführt hat. Danach werden Thylakoidmembranen bei erhöhten Temperaturen für Protonen durchlässig, noch bevor sich die Photosynthese abschwächt. Wenn die Protonen aber die undichte Membran einfach so durchqueren können, sind sie nicht mehr gezwungen, durch die ATP-Synthase zu strömen und sie in Rotation zu versetzen.

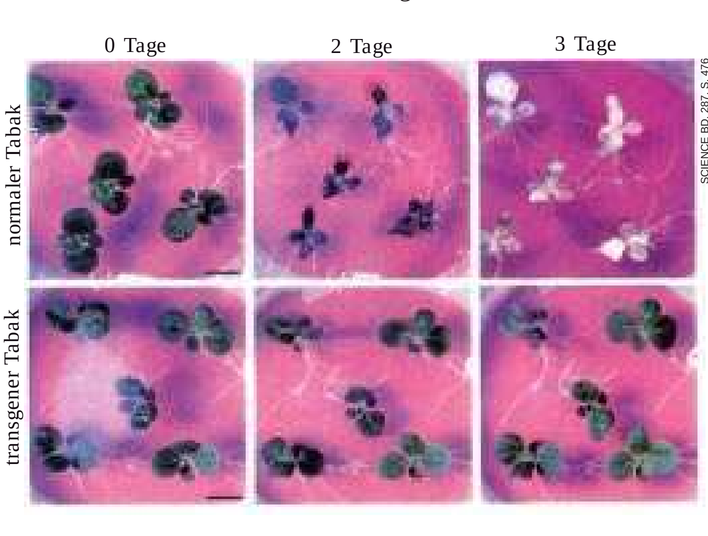
Den bisher besten Beleg für diese Theorie lieferten jetzt japanische Wissenschaftler (*Science, Bd. 287, S. 476*). Yuuki Murakami und seine Kollegen an der Kyushu-Universität in Fukuoka gingen von der Beobachtung aus, dass bei Pflanzen, die an warme Standorte angepasst sind, der Gehalt an dreifach ungesättigten Fettsäuren – wie Linolensäure – umso mehr abnimmt, je heißer es wird. Für die Synthese solcher Fettsäuren sorgt ein Enzym namens Omega-3-Fettsäuredesaturase.

Photosynthese auch in der Hitze

Dem Forscherteam gelang es nun, Tabakpflanzen genetisch so zu modifizieren, dass die sonst in Chloroplasten vorhandene Version der Desaturase nicht mehr gebildet wurde. Dadurch nahm der Anteil an Fettsäuren mit drei Doppelbindungen in der Thylakoidmembran drastisch ab und der mit zweifach ungesättigten Fettsäuren zu; so enthielten die Chloroplasten statt der Linolensäure nun überwiegend Linolsäure. Die Konzentration an einfach ungesättigten Fettsäuren blieb dagegen gleich. Auch die Zusammensetzung der Lipide in Membranen außerhalb der Chloroplasten war kaum verändert.

Der genetische Eingriff war ein voller Erfolg: Die modifizierten Tabakpflanzen vertrugen Hitze weitaus besser. Beim Erwärmen auf 40 Grad stieg ihre Photosyntheseleistung sogar um 20 Prozent und lag selbst bei 45 Grad noch auf dem Niveau von normalen Pflanzen bei Zimmertemperatur. Entsprechend wuchs der genveränderte Tabak bei höheren Temperaturen viel besser. Er überstand sogar unbeschadet drei Tage bei 47 Grad Celsius – Bedingungen, unter denen die Wildtyp-Exemplare eingingen (Bild).

Wegen der drohenden Erderwärmung durch den steigenden Gehalt der Atmosphäre an Treibhausgasen ist die Wirkung von hohen Temperaturen auf Pflanzen ein wichtiges Forschungsfeld. Die Ergebnisse von Murakami und seinen Kollegen bieten einen aussichtsreichen Ansatzpunkt, gentechnisch Varianten zu erzeugen, die auch unter Wärme-Stress noch effizient Sonnenlicht zum Aufbau ihrer Biomasse nutzen können.



Normale Tabakpflanzen, die einer Temperatur von 47 Grad Celsius ausgesetzt werden, sind nach drei Tagen abgestorben (oben), während genetisch veränderte Exemplare mit einem geringeren Gehalt an dreifach ungesättigten Fettsäuren keinen Schaden nehmen.

***Prof. Dr. Wolfgang Hachtel** forscht am Botanischen Institut der Universität Bonn über die Physiologie der Pflanzen. Seine Mitarbeiterin **Silvia Berger** ist Diplom-Geografin.*

Kosmischer Kokon



NASA AND THE HUBBLE HERITAGE TEAM (STSCI/AURA)

Als filigranes Gespinst ähnlich dem Kokon der Seidenraupe und zugleich vielfarbig leuchtend wie ein Opal erscheint der planetarische Nebel IC 418 auf dieser jüngsten Aufnahme des Hubble-Weltraumteleskops. Vor einigen tausend Jahren war der Stern im Zentrum ein roter Riese – ein spätes Stadium der stellaren Entwicklung, das die Sonne in etwa fünf Milliarden Jahren erreichen wird. Dann blies er seine äußersten Schichten davon. So entstand eine expandierende Hülle, die inzwischen einen Durchmesser von 0,1 Lichtjahren erreicht hat. Der heiße Überrest des roten Riesen badet den Nebel in UV-Licht und bringt ihn so zum Fluoreszieren. In der farbkodierten Aufnahme erscheint ionisierter Stickstoff in den relativ kühlen äußeren Regionen rot und ionisierter Sauerstoff im Zentrum blau. IC 418 liegt rund 2000 Lichtjahre entfernt im Sternbild „Hase“. Die Ursache der fädigen Struktur ist noch unklar.

Kosmisches Eis

Wiege des Lebens?

Eis in seiner uns vertrauten Form ist lebensfeindlich. Doch eine exotische Variante im Weltall kann die Bildung organischer Moleküle fördern – und hat vielleicht den Grundstein für das Leben auf der Erde gelegt.

Von David F. Blake und Peter Jenniskens

Als die Raumsonde Voyager 1 vor elf Jahren das Sonnensystem verließ, richteten die Nasa-Ingenieure die Bord-Kamera für einen letzten Schnappschuss auf die Erde. Zu sehen war nur noch ein winziger Punkt, der wegen der Streuung des Sonnenlichts in den riesigen Ozeanen blassblau erschien. In der Tat ist die Erde ein Wasserplanet. Wie weit Forscher auch um den Globus reisen und wie hoch oder tief sie ihre Messgeräte platzieren – überall wo sie auf flüssiges Wasser stoßen, finden sie irgendeine Form von Leben, das an diese spezielle Umgebung angepasst ist.

Wasser hat jedoch auch eine weniger erfreuliche Kehrseite. Bildet es im flüssigen Zustand die Voraussetzung für Leben, so ist es in fester, kristalliner Form sein schlimmster Feind. Organismen können in Geysiren hausen, sich in Salzlaken tummeln und in Säuren baden, aber gegen Eis in ihrem Inneren sind sie machtlos. Wenn Wasser gefriert, treibt die exakte Ordnung der Moleküle in den Kristallen gelöste Substanzen aus, und die scharfkantigen Eispartikeln zerreißen organisches Material unwiederbringlich. Zumindest gilt das für die Erde.

In den Weiten des interstellaren Raums aber ist eine ungewöhnliche Art von gefrorenem Wasser allgegenwärtig, das ganz andere Eigenschaften hat. Es kann jene Art von einfachen organischen Verbindungen beherbergen, aus denen das Leben hervorgegangen ist – und es erleichtert möglicherweise sogar deren Bildung. Demzufolge könnte interstellares Eis wesentlich an der Entstehung der ersten Organismen mitgewirkt haben.

Hinter der Frage nach dem Ursprung des Lebens steckt immer auch die nach der Herkunft der kohlenstoffhaltigen Substanzen, die seine Wegbereiter gewesen sind. Seit mehr als einem Jahrzehnt ist bekannt, dass organische Moleküle in interstellaren Wolken und Kometen vorkommen. Wissenschaftler gelangten außerdem zu dem Schluss, dass eine gefrorene Masse, die große Mengen Wassereis enthält, überall dort im Weltraum existiert, wo Staub und Gas tief genug abgekühlt werden, um zu Festkörpern zu kondensieren. In erster Linie sind das kalte Molekülwolken.

STECKBRIEF

Eis tritt wegen der speziellen Bindungen, die Wassermoleküle mit ihren Nachbarn eingehen, in einer Vielzahl unterschiedlicher Formen auf. In der kristallinen Variante, die natürlicherweise auf der Erde vorkommt, sind diese Wasserstoffbrücken starr fixiert. Bei Bestrahlung mit Ultraviolettlicht, das im tiefen Weltraum allgegenwärtig ist, können sie sich jedoch umlagern.

Anders als gefrorenes Wasser aus unserem Alltag kann das kosmische Eis deshalb Fremdsubstanzen lösen und sie als Reaktionspartner zusammenbringen. So sind vermutlich in den Weiten des Alls grundlegende organische Moleküle entstanden und dann mit Kometen auf die Erde gelangt.

Organische Moleküle aus dem All

Viele Planetenforscher gehen noch einen Schritt weiter. Ihrer Ansicht nach sind die im Eis gebundenen organischen Stoffe im Huckepackverfahren auch zur Erde gelangt. Als vor 4,5 Milliarden Jahren eine kalte Molekülwolke in sich zusammenstürzte und dabei unser Sonnensystem bildete, habe sich ein Teil des enthaltenen Eises mitsamt etwas Staub zu Kometen zusammengeballt. Diese „schmutzigen Schneebälle“ könnten dann mit der noch jungen Erde kollidiert sein und ihre organischen Verbindungen darauf deponiert haben. So entstand jene „Ursuppe“ auf unserem Planeten, in der sich schließlich die ersten primitiven Lebensformen entwickelten.

Auch nach der Entdeckung organischer Substanzen im interstellaren Raum blieb allerdings unklar, wie sie dort entstehen. Untersuchungen von Wasser bei Temperaturen in der Nähe des absoluten Nullpunkts (wo jegliche Molekularbewegung zum Stillstand kommt) haben kürzlich jedoch die Antwort verraten. Danach gaben minimale Änderungen in der Struktur von Eis den Anstoß für den Zusammenschluss von Kohlenstoff, Stickstoff und weiteren ▶



Dunkle Gas- und Staubwolken in Nebeln wie NGC1999 im Sternbild Orion sind die größten Eiskammern im Weltraum.

biologisch unverzichtbaren Elementen zu ersten organischen Verbindungen.

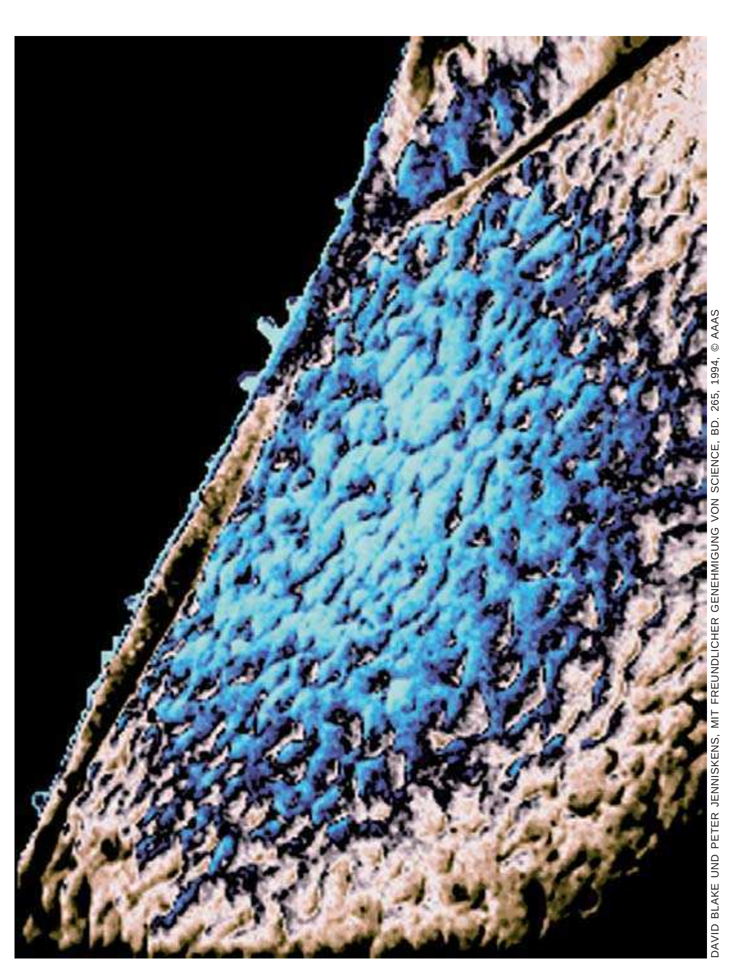
Auch unser Team am Ames-Forschungszentrum der Nasa spürte den geheimnisvollen und überraschenden Eigenschaften von interstellarem Eis nach. Dabei fanden wir bestätigt, dass es – wissenschaftlich gesagt – amorph ist: Es weist keine nennenswerte molekulare oder atomare Ordnung auf und hat folglich auch keine Kristallflächen mit definierten Kanten und Ecken. Einem Weltraumreisenden erschiene es so durchsichtig wie Fensterglas.

Die meisten Festkörper kommen in der Natur in Form von Kristallen vor, in denen die Atome oder Moleküle in einem regelmäßigen Gitter angeordnet sind. Wenn manche Flüssigkeiten rasch abgekühlt werden, bleibt den herumschwirrenden Teilchen jedoch nicht genug Zeit, die vorgesehenen Plätze einzunehmen. Die Schmelze erstarrt dann in einem amorphen Zustand. Das bekannteste Beispiel dafür ist Glas, bei dem es sich, grob betrachtet, um eine nicht-kristalline Form von Quarz handelt.

Bei flüssigem Wasser funktioniert der Trick mit dem Abschrecken allerdings nicht. Es kristallisiert, auch wenn man es sehr schnell abkühlt. Darum wurde amorphes Eis erst 1935 entdeckt, als Forscher den Festkörper untersuchten, der sich beim langsamen Abscheiden von Wasserdampf im Vakuum bildet.

Sogar viele Nichtchemiker wissen, dass Wasser eine Verbindung aus einem Sauerstoff- und zwei Wasserstoffatomen ist. Seine große biologische Bedeutung aber beruht darauf, dass das Sauerstoffatom zwei keulenartig vorspringende Elektronenpaare hat, die schwache Bindungen mit den leicht positiv geladenen Wasserstoffatomen benachbarter Wassermoleküle eingehen können. Diese so genannten Wasserstoffbrückenbindungen verknüpfen auch die Moleküle von flüssigem Wasser schon zu lockeren Aggregaten. Unterhalb des Gefrierpunkts sorgen sie dann für die exakte Anordnung der Wassermoleküle in Reih und Glied.

Welche Kristallstruktur dabei angenommen wird, hängt unter anderem von Druck und Temperatur ab. Man kennt nicht weniger als zwölf Formen von kristallinem Eis, aber nur eine einzige – die hexagonale – kommt natürlicherweise auf der Erde vor. Die Sauerstoffatome bilden darin ein Muster mit sechsfacher Drehsymmetrie, das sich in der Gestalt von Schneeflocken wieder findet. Bei Temperaturen deutlich unterhalb des Gefrierpunkts können sich die Sauerstoffatome dagegen in einem würfelförmigen Gitter anordnen.



Diese mikroskopisch dünne Schicht aus amorphem und kubischem Eis (blau) entstand, als Forscher einen wenige hundert Moleküle dicken, extrem kalten Eisfilm in einem Tieftemperaturmikroskop auf 183 Kelvin (–90 Grad Celsius) erwärmten.

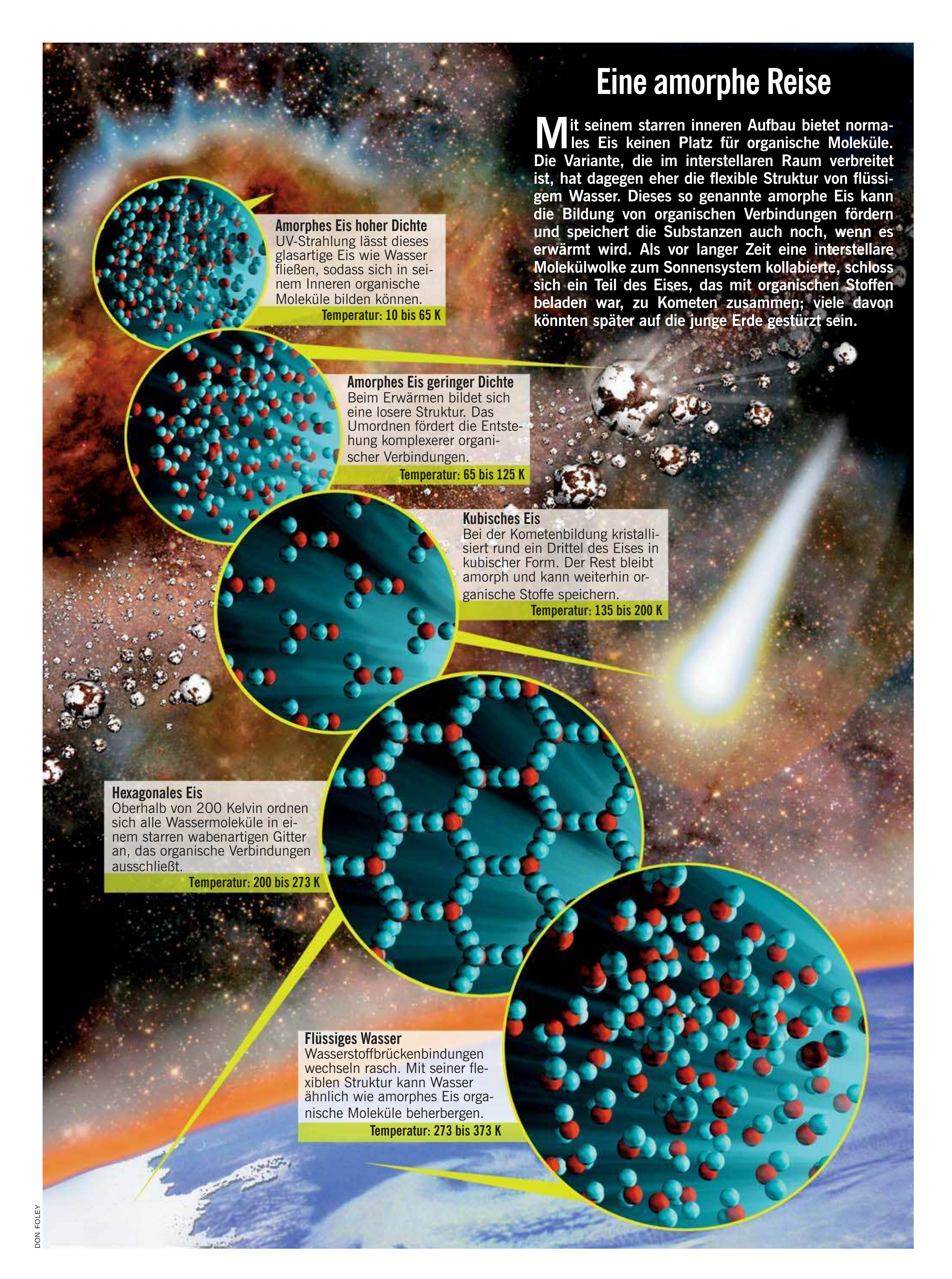
Ultrakaltes Eis kann wie Wasser fließen

Während die Wasserstoffbrückenbindungen in kristallinem Eis fixiert sind, werden sie in flüssigem Wasser ständig in raschem Wechsel gelöst und neu geknüpft. Dieser Unterschied ist für das Entstehen von Leben entscheidend. Die flexible Umordnung der Bindungen befähigt flüssiges Wasser, seine innere Struktur an die physikalischen und chemischen Erfordernisse von Organismen anzupassen. So wie eine Gasblase in Wasser, nicht aber in festem Eis aufsteigen kann, müssen organische Moleküle in der Lage sein, sich zwischen Wassermolekülen zu bewegen. Das erst ermöglicht ihnen, sich zu komplexeren Verbindungen zusammenzuschließen.

Auch in amorphem interstellarem Eis sind die Wasserstoffbrückenbindungen nicht starr fixiert. Darauf beruht seine vielleicht faszinierendste Eigenschaft: Selbst bei einer Temperatur dicht über dem absoluten Nullpunkt (–273,15 Grad Celsius oder 0 Kelvin) kann es fließen, wenn es mit ultraviolettem Licht bestrahlt wird, das im tiefen Weltraum allgegenwärtig ist. Durch diese Eigenschaft vermag interstellares Eis ebenso wie flüssiges Wasser die Entstehung von organischen Verbindungen zu fördern.

Auf deren Spur kamen Wissenschaftler in den frühen siebziger Jahren, als sie die Chemie in den Zentren kalter Molekülwolken im interstellaren Raum erforschten. Damals führten J. Mayo Greenberg von der Universität Leiden (Niederlande) und Louis J. Allamandola vom Ames-Forschungszentrum bahnbrechende Untersuchungen durch. Demnach bestehen bis zu zehn Prozent des Volumens von interstellaren Eiskörnern aus einfachen Molekülen wie Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Methanol und Ammoniak.

Seither konnten Astronomen mehr als hundert verschiedene organische Verbindungen in kalten Molekülwolken nachweisen. Das gelang mit speziellen Teleskopen für Infrarot- und Submillimeter-Strahlung, die von Staub und Gas weniger zurückgehalten wird als gewöhnliches Licht. Die Wissenschaftler verglichen Infrarotspektren von Wolken im Weltraum mit solchen von „interstellarem Eis“, das sie im Labor hergestellt ▶



Eine amorphe Reise
Mit seinem starren inneren Aufbau bietet normales Eis keinen Platz für organische Moleküle. Die Variante, die im interstellaren Raum verbreitet ist, hat dagegen eher die flexible Struktur von flüssigem Wasser. Dieses so genannte amorphe Eis kann die Bildung von organischen Verbindungen fördern und speichert die Substanzen auch noch, wenn es erwärmt wird. Als vor langer Zeit eine interstellare Molekülwolke zum Sonnensystem kollabierte, schloss sich ein Teil des Eises, das mit organischen Stoffen beladen war, zu Kometen zusammen; viele davon könnten später auf die junge Erde gestürzt sein.
Amorphes Eis hoher Dichte
UV-Strahlung lässt dieses glasartige Eis wie Wasser fließen, sodass sich in seinem Inneren organische Moleküle bilden können.
Temperatur: 10 bis 65 K
Amorphes Eis geringer Dichte
Beim Erwärmen bildet sich eine losere Struktur. Das Umordnen fördert die Entstehung komplexerer organischer Verbindungen.
Temperatur: 65 bis 125 K
Kubisches Eis
Bei der Kometenbildung kristallisiert rund ein Drittel des Eises in kubischer Form. Der Rest bleibt amorph und kann weiterhin organische Stoffe speichern.
Temperatur: 135 bis 200 K
Hexagonales Eis
Oberhalb von 200 Kelvin ordnen sich alle Wassermoleküle in einem starren wabenartigen Gitter an, das organische Verbindungen ausschließt.
Temperatur: 200 bis 273 K
Flüssiges Wasser
Wasserstoffbrückenbindungen wechseln rasch. Mit seiner flexiblen Struktur kann Wasser ähnlich wie amorphes Eis organische Moleküle beherbergen.
Temperatur: 273 bis 373 K

DON FOLEY

hatten. Dabei konnten sie ihre Vorstellungen über den Ursprung der organischen Verbindungen im All präzisieren. Diese mussten großenteils in Eisschichten entstanden sein, die auf einem Kern aus Silicat oder Kohlenstoff aufgefroren waren. In dichten Molekülwolken sind solche vereisten Staubkörner nicht größer als ein zehntausendstel Millimeter.

Zunächst blieb allerdings unklar, durch welche chemischen Reaktionen sich die organischen Moleküle im All gebildet haben könnten. Die Bedeutung der ungewöhnlichen Eigenschaften von interstellarem Eis für die Synthese von Kohlenstoff-Verbindungen wurde erst 1993 deutlich, als wir im Labor für Weltraummikroskopie am Ames-Forschungszentrum mit der Untersuchung jener Eisformen begannen, die ausschließlich bei niedrigen Drücken auftreten. Dazu froren wir Wasserdampf in einem geeignet modifizierten Tieftemperatur-Elektronen-Transmissions-Mikroskop aus (siehe Bild rechts). Auf diese Weise ließen sich in dem Gerät nur wenige hundert Moleküle dicke Eisfilme erzeugen. Um Änderungen ihrer Gestalt und Struktur zu beobachten, nahmen wir, während wir sie aufwärmten oder abkühlten, Bilder der Proben mit hoher Vergrößerung sowie Elektronenbeugungsmuster auf.

Bei hinreichend tiefen Temperaturen (unter 30 Kelvin) und genügend langsamer Abscheidung (weniger als 0,1 Millimeter pro Stunde) bildete sich ein amorpher Festkörper, der den Strukturen von interstellarem Eis sehr ähnlich war, wie sie aus Infrarotspektren abgeleitet wurden. Er wies eine besondere Struktur mit hoher Dichte auf, die zuvor nur von einem Röntgenbeugungsexperiment aus dem Jahre 1976 bekannt war. Wir fanden bestätigt, dass Wasserdampf, den man bei etwa 14 Grad über dem absoluten Nullpunkt abscheidet, eine andere amorphe Struktur hat als ein Film, der bei 77 Kelvin aufgedampft wird. Tatsächlich konnten wir beim langsamen Erwärmen des Eises den Übergang von der Tief- in die Hochtemperaturform verfolgen. Das Beugungsmuster der ersteren ließ sich am besten durch die Annahme erklären, dass sich einige Wassermoleküle in unregelmäßige Hohlräume zwängen, welche die Nachbarmoleküle bilden. Dadurch werden die Sauerstoffatome sehr eng gepackt, und es entsteht amorphes Eis hoher Dichte. Mit 1,1 Gramm pro Kubikzentimeter liegt sein spezifisches Gewicht etwa 15 Prozent über dem von gewöhnlichem Eis.

Mit Kometen huckepack zur Erde

Wir bestätigten auch Ergebnisse, die Hans Günther Heide 1984 am Berliner Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft gewonnen hatte. Der deutsche Forscher schoss seinerzeit sehr energiereiche Elektronen auf amorphes Eis hoher Dichte. Dieses änderte während der Bestrahlung unablässig seine Struktur und begann regelrecht zu fließen. Einzige Voraussetzung: Das Bombardement mit Elektronen musste bei Temperaturen unter 30 Kelvin stattfinden.

Im interstellaren Eis können sich biologisch wichtige Elemente zu organischen Verbindungen zusammenschließen

Die Entdeckung, dass amorphes Eis flüssigem Wasser ähnlicher ist als gefrorenem, war eine Riesenüberraschung. Die meisten Wissenschaftler hatten zuvor angenommen, dass alle Formen von Wassereis bei Temperaturen unterhalb von etwa fünfzig Kelvin ihren inneren Aufbau strikt beibehalten. Wie Heide jedoch herausfand, wandelt sich derart kaltes Eis beim Beschuss mit Elektronen unabhängig von seiner ursprünglichen Struktur in die amorphe Form hoher Dichte um. Andere Forscher entdeckten später, dass Ultraviolett-Strahlung, der kalte Molekülwolken häufig ausgesetzt sind, denselben Effekt haben.

Demnach sollte interstellares Eis überwiegend in der amorphen Hochdichte-Form vorliegen. Die unregelmäßig zusammengezwängten Wassermoleküle in dieser Struktur ermöglichen eingeschlossenen Fremdatomen oder -molekülen eine gewisse Beweglichkeit. Auf diese Weise können sich die biologisch wichtigen Elemente Kohlenstoff, Sauerstoff und Stickstoff begegnen und zu organischen Verbindungen zusammenschließen. Außerdem haben verschiedene Untersuchungen gezeigt, dass bei Bestrahlung von amorphem Eis hoher Dichte mit energiereichen Teilchen oder Lichtquanten Fremdmoleküle wie Kohlenmonoxid oder Ammoniak in hochreaktive Fragmente – so genannte Radikale – aufgespalten werden. Diese können dann im Eis umherwandern, bis sie auf andere reaktive Teilchen treffen, und sich mit ihnen verbinden.

Damit hatten wir einen plausiblen Mechanismus für den Ursprung von organischen Verbindungen in interstellarem Eis gefunden. Als Nächstes stellte sich nun die Frage, wie diese Stoffe unversehrt auf die Erde gelangen konnten. Die geeignetsten Tiefkühltransporter sind Kometen – Überbleibsel der Eisbrocken, die sich beim Gravitationskollaps der kalten Molekülwolke bildeten, aus der unser Sonnensystem entstand. In der Nähe der jungen Sonne herrschten so hohe Temperaturen, dass fast alle Elemente und Verbindungen in Gasform vorlagen. In den kühleren Gebieten außerhalb der Umlaufbahn von Jupiter dagegen könnten amorphes Eis und die in ihm erzeugten organischen Verbindungen erhalten geblieben sein, als sich der Staub zu Kometen und anderen kleinen Körpern verband.

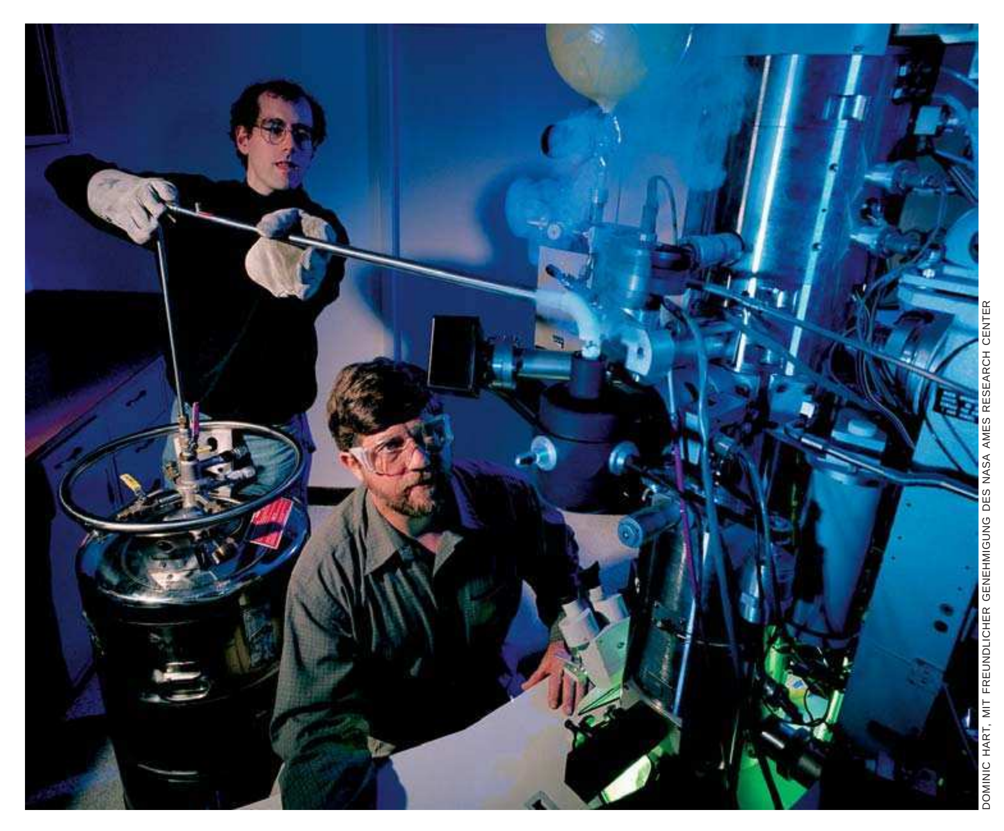
Selbst heute liegt ein Großteil des Wassereises in Kometen noch in amorpher Form vor. Darauf deuten Untersuchungen des Schweifs hin, den die schmutzigen Schneebälle entwickeln, wenn sie beim Durchqueren des inneren Sonnensystems in Sonnennähe aufgeheizt werden und Gase wie Kohlenmonoxid und Methan freisetzen. Das geschieht allerdings erst bei wesentlich höheren Temperaturen, als man erwarten würde, wenn diese äußerst leichtflüchtigen Substanzen als separate Festkörper vorlägen. In diesem Falle würden sie schon bei viel niedrigeren Temperaturen verdampfen – lange, bevor die Kometen das innere Sonnensystem erreicht hätten. Offensichtlich müssen die Gase in der Eisstruktur eingeschlossen sein, die Frage ist nur wie.

Bei der Bildung eines Kometen erwärmt sich das Eis und wandelt sich dadurch vermutlich in die amorphe Form mit niedriger Dichte um. Unseren Tieftemperaturexperimenten zufolge verläuft der Übergang graduell zwischen 35 und 65 Kelvin. Da dabei Wasserstoffbrücken-

Literaturhinweis

Organic Molecules in the Interstellar Medium, Comets and Meteorites: A Voyage from Dark Clouds to Early Earth. Von P. Ehrenfreund und S. Charnley in: Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Bd. 38, S. 427, 2000.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*



DOMINIC HART, MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DES NASA AMES RESEARCH CENTER

Flüssiges Helium kühlt ein spezielles Elektronenmikroskop, in dem die Autoren Peter Jenniskens (links) und David F. Blake eine Probe aus amorphem Eis präparieren. Beim Einfüllen in die Apparatur verdunstet das Edelgas teilweise und erzeugt in der feuchten Laborlift wabernde Wolken aus kondensiertem Wasserdampf.

bindungen aufbrechen und sich neu bilden, erhöht sich für die Radikale im Eis die Chance, zu wandern, sich zu begegnen und miteinander zu reagieren. Wenn sich das Eis allerdings so stark erwärmt, dass es kristallisiert, werden alle flüchtigen Fremdmoleküle ausgestoßen und ins All getrieben.

Glaseis wird zu Sirup

Wie hängt die Kristallisation von der Zeit und der Temperatur ab? Unseren Untersuchungen zufolge beginnt sie in einer ersten Stufe bei etwa 135 Kelvin. Dabei ordnen sich die Wassermoleküle in einem kubischen Gitter an (siehe Abbildung auf Seite 31). Organische Moleküle fänden darin keinen Platz. Wir entdeckten aber, dass eine gesonderte amorphe Komponente bestehen bleibt. Nur ungefähr ein Drittel des gesamten Eisvolumens kristallisiert; der Rest behält eine ungeordnete Struktur, die sich kaum von der bei tieferen Temperaturen unterscheidet.

Schon länger war bekannt, dass sich amorphes Eis zwischen 125 und 136 Kelvin in eine viskose Flüssigkeit verwandelt. Dieses Phänomen tritt auch bei anderen amorphen Materialien wie Fensterglas auf und wird als Glasübergang bezeichnet. Unterhalb dieses kritischen Temperaturbereichs ist das Material nicht deformierbar und verhält sich wie ein spröder Festkörper; oberhalb lässt es sich plastisch verformen. Allerdings gleicht die Viskosität der Flüssigkeit knapp oberhalb des Glasübergangs eher der von kaltem Sirup als von gewöhnlichem Wasser. Eine Bewegung, die dort eine Sekunde dauert, würde in der hochviskosen Variante 100000 Jahre benötigen. Aber im Dasein eines Kometen ist das ja keine sonderlich lange Zeit.

Bis zu unserer Entdeckung war kaum jemand auf die Idee gekommen, die viskose Form von amorphem Eis im Weltraum zu vermuten. Es galt als selbstverständlich, dass oberhalb von 135 Kelvin die ungeordnete Tieftemperaturmodifikation rasch im kubischen Gitter kristallisiert. Wir fanden jedoch heraus, dass die viskose Flüssigkeit zwischen 150 und 200 Kelvin beliebig lange mit dem kubischen Eis koexistieren kann. Sie ist daher vielleicht ein wesentlicher Bestandteil der Kometen und auch der eisförmigen Monde unserer Nachbarplaneten, deren Temperaturen alle in diesem Bereich liegen. Das Gemisch aus viskoser Flüssigkeit und kristallinem Eis könnte Fremdmoleküle eingeschlossen und so wichtige organische Verbindungen über lange Zeiten gespeichert haben – bis ein Komet irgendwann vielleicht auf die Erde traf.

Und das führt uns zurück in irdische Sphären. Erwärmt sich das Gemisch aus kubischem Eis und viskoser Flüssigkeit auf etwa 200 Kelvin (immer noch eine ausgesprochen frostige Temperatur von –73 Grad Celsius), wandelt es sich vollständig in die alltägliche hexagonale Form um. Während dieser Rekristallisation werden sämtliche verbliebenen Fremdsubstanzen – einschließlich der organischen Verbindungen – aus dem Festkörper ausgetrieben. Und dann ist das Eis genau so, wie wir es von Schneeflocken, Gletschern oder Martini on the rocks kennen. Aber zum Glück haben die organischen Verbindungen jetzt einen neuen Zufluchtsort gefunden, nämlich das fast überall auf der Erde vorkommende flüssige Wasser.

Wie es scheint, war Wasser also in fester oder flüssiger Form von Anfang bis Ende an der Bildung und Weiterentwicklung von Basismolekülen für das Leben beteiligt. Es erlebte eine lange Reise von seinen Ursprüngen als gefrorene Schicht auf interstellaren Staubpartikeln bis zu seinem letztendlichen Schicksal als flüssiges Wasser auf der Erde – und vielleicht in anderen bewohnbaren Gebieten des Universums.

Die exotischen Formen von Eis mit ihren besonderen physikalischen und chemischen Eigenschaften, die wir gerade erst zu verstehen beginnen, könnten am Ende also mehr über die Geschichte des Universums verraten, als Wissenschaftler dies jemals für möglich gehalten hätten. ■

David F. Blake *leitet am Ames-Forschungszentrum der NASA die Abteilung für Astrobiologie und das Labor für Weltraummikroskopie, das er 1990 gegründet hat. Zu seinen wissenschaftlichen Interessen gehören außer amorphem Eis auch die Suche nach Leben in extraterrestrischem Gestein und die Entwicklung von Weltrauminstrumenten zur Analyse von Mineralien auf anderen Planeten.* ***Peter Jenniskens*** *ist seit 1993 Mitarbeiter von Blake. Er leitete die erste astrobiologische Mission der NASA mit dem Ziel, während der letztjährigen Leoniden-Schauer den Aufprall von Kometenmaterie auf der Erde zu erforschen.*

ASTRONOMIE

Frühe Galaxienhaufen

Wie gigantische glühende Gaskugeln sehen sie aus: die neu entdeckten Galaxienhaufen in fünf Milliarden Lichtjahren Entfernung. Aufgenommen wurden die kosmischen Ballungszentren seinerzeit vom Röntgen-Satelliten ROSAT, dessen neunjährige Betriebsdauer 1999 endete. Doch die von ihm gelieferten Daten sind immer noch für manche Überraschung gut. So identifizierte Harald Ebeling vom Institut für Astronomie der Universität Hawaii bei ihrer Auswertung bisher 101 uralte Galaxienhaufen, die jeweils Hunderte bis Tausende von Milchstraßensystemen umfassen. Während einige Kerne haben, weisen andere fadenförmige Strukturen auf, die Schleifen und Bögen bilden. Die Lage der Galaxien am Rand des sichtbaren Universums bedeutet, dass sie bereits entstanden sind, als das Weltall halb so alt war wie heute. Ihre große Zahl läßt sich nur erklären, wenn man annimmt, dass eine Art Antigravitation die Expansion des Universums stetig beschleunigt. Dies stützt die neuesten kosmologischen Modelle.



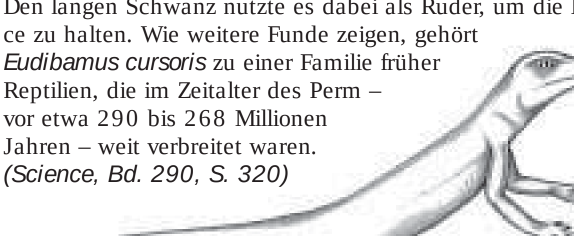
NASA, HUBBLE

Galaxienhaufen am Rande des Kosmos

PALÄONTOLOGIE

Steinalte Zweibeiner

Dass der Mensch den aufrechten Gang nicht erfunden hat, ist bekannt. Schon in der späten Trias, vor 210 Millionen Jahren, erhoben sich einzelne Dinosaurier und im Jura die Vögel auf ihre Hinterbeine. Wie Ausgrabungen von Robert R. Reisz nun zeigten, waren auch sie jedoch nicht die Ersten, die auf zwei Beinen über die Erde wandelten. Das Team von der Universität Toronto fand in einem Steinbruch bei Gotha das fast vollständig erhaltene Skelett eines Reptils, das lange vor den Dinosauriern lebte und schon alle Merkmale einer aufrechten Fortbewegung aufwies: Seine Hinterbeine sind um 64 Prozent länger als die Vorder-Extremitäten und länger als der Rumpf. Auch die Füße waren ungewöhnlich groß für das 26 Zentimeter kleine Reptil *Eudibamus cursoris*, das wahrscheinlich ziemlich schnell über den Boden des frühen Perm rannte. Den langen Schwanz nutzte es dabei als Ruder, um die Balance zu halten. Wie weitere Funde zeigen, gehört *Eudibamus cursoris* zu einer Familie früher Reptilien, die im Zeitalter des Perm – vor etwa 290 bis 268 Millionen Jahren – weit verbreitet waren. *(Science, Bd. 290, S. 320)*



SCIENCE

Eudibamus cursoris **lief als Erster auf zwei Beinen.**

MEDIZIN

Weibliches Hormon hält Männer schlank

Wenn Frauen in die Wechseljahre kommen, erleben sie oft eine unliebsame Begleiterscheinung der hormonellen Umstellung: Sie nehmen zu. Ursache hierfür ist die nachlassende Produktion des Geschlechtshormons Östrogen. Dadurch verlangsamt sich der Stoffwechselumsatz, und die Einlagerung von Fett nimmt zu. Doch nicht nur Frauen produzieren das weibliche Steroidhormon. Auch Männer bilden es in geringen Konzentrationen, allerdings in der Nebennierenrinde statt in den Ovarien. Entsprechend ist ihre gute Figur gleichfalls vom Östrogenspiegel abhängig. Wie Patricia Heine von der Universität Illinois in Urbana-Champaign herausfand, gilt dies zumindest für männliche Nager. Das Team der amerikanischen Forscherin untersuchte so genannte Knock-out-Mäuse, denen der Rezeptor für Östrogen fehlte. Somit konnte das Hormon nicht an die Zielzellen andocken und seine Wirkung entfalten. Trotz gleicher Futtermenge bildeten die Knock-Out-Mäuse über einen Zeitraum von einem Jahr um bis zu 170 Prozent mehr Fettgewebe als die Tiere mit intakten Östrogen-Rezeptoren. Herren mit Bauchansatz bietet sich damit eine elegante Ausrede: Nicht mangelnde Bewegung und falsche Essgewohnheiten sind schuld am Übergewicht, sondern ein weibliches Hormon – beziehungsweise das Fehlen desselben. *(Proceedings of the National Academy of Sciences, Bd. 97, S. 12729)*

ZOOLOGIE

Zuwachs bei Lemuren



FIELD MUSEUM OF NATURAL HISTORY (CHICAGO)

Schädel der drei neuen Mausmakis

Sie wiegen weniger als 100 Gramm, und ihr Kopf ist nicht größer als der menschliche Daumennagel: Die Rede ist von Mausmakis. Nun hat ein internationales Forschungsteam drei neue Spezies dieser baumbewohnenden Primaten in ihrem Lebensraum auf Madagaskar und den nordwestlich vorgelagerten Komoren entdeckt. Genetische Untersuchungen bestätigten, dass die Distanz zwischen den jetzt aufgefundenen Winzlingen sogar größer ist als die zwischen den schon bekannten vier Arten. Demnach bilden sie eindeutig eigene Spezies. Die langen Nasen, hochbeweglichen Lippen und großen, durchdringenden Augen der Tiere bekommt man allerdings selten zu sehen; denn die Äffchen werden erst nachts aktiv. Dass sie nur auf Madagaskar und den umliegenden Inseln vorkommen, liegt an der Abgeschiedenheit der Ökosysteme. Vor etwa 165 Millionen Jahren wurde Madagaskar vom afrikanischen Festland getrennt, und seine Flora und Fauna hat sich seither weitgehend eigenständig entwickelt. *(International Journal of Primatology, Bd. 21, S. 963)*

ARCHÄOLOGIE

Pyramidenbauer befragten die Sterne

Die Pyramiden von Gizeh in Ägypten beeindrucken nicht nur durch ihre Größe, sondern auch durch ihre fast exakte Orientierung in Nord-Süd-Richtung. Wie konnten die Ägypter die Himmelsrichtungen schon vor etwa 4500 Jahren so genau bestimmen? Einen Kompass gab es jedenfalls noch nicht, und auch der Polarstern stand nicht am Nordpol. Kate Spence von der Cambridge Universität hat nun einen anderen Richtungsweiser am damaligen Sternenhimmel ausgemacht. Bei der Suche danach bezog sie die Präzession der Erdachse mit einem Rhythmus von 26 000 Jahren in ihre Berechnungen ein. Wie sie herausfand, konnten die ägyptischen Baumeister zwei Sterne zur Orientierung heranziehen. Denn im Jahre 2467 v. Chr. standen Kochab im Sternbild Kleiner Bär und Mizar im Großen Wagen zu einem bestimmten Zeitpunkt so übereinander, dass eine Senkrechte zwischen ihnen den Nordpol bestimmte. Dies erklärt zugleich die Abweichungen der verschiedenen Pyramiden von der exakten Nord-Süd-Orientierung: Die beiden Sterne verlagerten sich im Laufe der Zeit, und so erhielt jede Pyramide eine neue, leicht divergierende Ausrichtung. Damit aber kann man die Pyramiden nun auch auf zehn Jahre genau datieren, während die historischen Zeugnisse einen Spielraum von hundert Jahren ließen. *(Nature, Bd. 408, S. 320)*



PREMIUM

Großer Wagen

Mizar

Nordpol

Kochab

Kleiner Bär

NATURE

An den Sternen ausgerichtet: die Pyramiden von Gizeh

CHEMIE

Guter Ton für Gen-Taxis

Bei der Gentherapie dienen meist Viren als Transportmittel, da sie ihr Erbmaterial mühelos durch die Zellmembran schleusen können. Allerdings rufen sie gelegentlich gefährliche Nebenwirkungen hervor, die diese Behandlungsform in Verruf gebracht haben. Nun hat das Team um Jin-Ho Choy von der Universität Seoul einen völlig neuen und ungefährlichen Weg entdeckt, auf dem sich das Erbmolekül DNA (Desoxyribonukleinsäure) in die Zielzelle einbringen lässt. Die Chemiker benutzten eine anorganische Verbindung aus Magnesium-Aluminium-Hydroxid als Genfähre. Es handelt sich um ein schichtartig aufgebautes Tonmineral. Zwischen zwei Lagen befindet sich jeweils ein Zwischenraum, der mit negativ geladenen Ionen gefüllt ist. Diese können durch ebenso geladene DNA-Moleküle ersetzt werden, wobei sich der Abstand der beiden Schichten an die Größe der eingelagerten Moleküle anpasst. Gut abgeschirmt, kann das Gen dann die Membran passieren. Innerhalb der Zelle wird die Fähre anschließend von so genannten Lysosomen verschluckt, deren Aufgabe es unter anderem ist, eingedrungene Fremdstoffe unschädlich zu machen. Im sauren Milieu dieser Organellen löst sich das Transportmittel auf und gibt das Gen frei. *(Angewandte Chemie, Bd. 112, S. 4042)*

PHYSIK

Laser lassen künstliche Muskeln spielen

NATURE

Bislang sind Roboter noch ein wenig ungelenk, da ihnen die zur Feinmotorik nötigen Muskeln fehlen. Doch japanische Wissenschaftler haben nun den Weg zu einem künstlichen Bizeps gebahnt, der sich per Laser steuern lässt. Hiroaki Misawa und sein Team von der Tokushima Universität experimentierten hierzu mit Gelen aus polymerisiertem N-Isopropylacrylamid. Diese setzen sich aus langen Molekülketten zusammen und quellen in Wasser stark. Wasserstoffbrückenbindungen und Van-der-Waals-Kräfte suchen die Ketten zusammenzuziehen, elektrostatische und hydrophobe Kräfte sie dagegen auseinanderzudrücken. Misawa und seine Mitarbeiter konnten diese heikle Balance gezielt mit einem Laser beeinflussen. Wenn sie einen mit dem Gel gefüllten Zylinder bestrahlten, zog er sich hantelförmig zusammen, kehrte aber nach Abschalten des Lasers augenblicklich in seine Ausgangsform zurück. Die reversible Bewegung lief in weniger als einer Sekunde ab. Um eine Erhitzung zu vermeiden, benutzten die Chemiker schweres Wasser – D_2O – als Lösungsmittel. Denn die Bindung zwischen dem Wasserstoffisotop Deuterium und Sauerstoff absorbiert den Laserstrahl nicht, und das Wasser bleibt somit kühl. *(Nature, Bd. 408, S. 178)*



Künstlicher Muskel beim Kontrahieren

NATURE

Klonen bedrohter Tiere – Die neue Arche Noah

Um selten gewordene Tiere vor dem Aussterben zu retten, könnte man sie klonen. Der biotechnische Eingriff bietet sich besonders bei solchen gefährdeten Arten an, die sich allein nicht genügend vermehren oder deren Lebensraum schwindet. Leihmütter, die zu einer nicht bedrohten Art gehören, würden die Klone austragen.

VON ROBERT P. LANZA, BETSY L. DRESSER UND PHILIP DAMIANI

Noah soll jetzt (im November 2000) zur Welt kommen – das erste geklonte Jungtier einer bedrohten Art. Seine „Mutter“, die ihn austrug, ist ein Hausrind, eine Kuh in Iowa. Das Kalb Noah aber ist ein junger Gaur und damit ein Spross des größten heutigen Wildrindes, dessen Bullen mehr als zwei Meter hoch und über drei Meter lang werden.

In Indien, Indochina und Südostasien bewohnen die Gaure Wälder, Bambusdschungel und Grasländer. Von den massigen Rindern leben in freier Natur vermutlich noch höchstens 36000 Tiere in einigen Restpopulationen. Der Mensch bejagte den tonnenschweren Wiederkäuer über Generationen zum Zeitvertreib und zerstörte in letzter Zeit auch seinen Lebensraum immer mehr. Deswegen führt der Internationale Naturschutzverband (IUCN) den Gaur auf der Roten Liste der gefährdeten Arten. Das Washingtoner Artenschutzabkommen (CITES) verbietet den Handel mit Gauren: mit lebenden Tieren genauso wie mit ihren Hörnern, Fellen, Hufen und anderen Teilen.

Mit Noah beginnt eine neue Zeit der Schutzbemühungen um bedrohte Arten. Ihm sollen andere Jungtiere derselben und anderer seltener, gefährdeter Säugerarten folgen. Das eigentlich Aufregende an Noahs Geburt: Dieses Kalb stellt den quicklebendigen Beweis dafür dar, dass die „Leihmutter“ für einen Klon – ein genaues Duplikat eines bestimmten erwachsenen Tiers – durchaus einer fremden Art angehören kann.

In ähnlicher Weise möchten wir zukünftig den Bongo – eine große afrikanische Antilope –, den Sumatra-Tiger und den Großen Panda (den Bambusbären) klonen, den Liebling von Zoobesuchern, der sich in Gefangenschaft schwer fortpflanzt. Vielleicht gelingt es uns sogar, einige jüngst ausgestorbene Säugetierarten oder Unterarten wieder zum Leben zu erwecken. Wir denken beispielsweise an den Pyrenäen-Steinbock, der eine Unterart des Spanischen (Iberischen) Steinbocks darstellt. Spanier nennen diese

CHRISTIAN GRZIMEK / OKAPIA



„Bergziege“ Bucardo. Die letzte Bucardogeiß wurde vor einem Jahr von einem Baum erschlagen. Spanische Wissenschaftler haben von dem Tier aber Zellproben konserviert.

Dank der Fortschritte im Klonen könnten wir zum Beispiel bedrohte Arten retten, deren Lebensraum verschwindet, deren Vermehrung in Gefangenschaft aber sehr schwierig ist. Auf diese Weise würde man die Spezies solange erhalten und weiter vermehren, bis wir diesen Tieren wieder ausreichend natürlichen Lebensraum bieten können. Dann ließen sich die Tiere aus der Menschenobhut wieder auswildern.

Der größte Vorteil des Klonens gefährdeter Arten: Leben von einer Art nur noch wenige Tiere, sodass das Erbgut jedes einzelnen zählt, können wir mit Hilfe von Körperzellen die Gene jedes Einzeltiers in den Genpool der Art zurückbringen. Im Prinzip ließen sich Embryonen auch durch künstliche Befruchtung isolierter Eizellen erzeugen und dann auf Leihmütter übertragen. Doch die Praxis sieht vorläufig anders aus. Weder verfügen die meisten Zoos über eine entsprechende Ausstattung, um von den oft besonders heiklen Pfleglingen Samen zu gewinnen und fachgerecht einzufrieren. Noch lassen sich Eizellen ohne größeren Aufwand beschaffen; und sie werden durch Einfrieren beschädigt. Zum Klonen genügt es dagegen, Körperzellen aufzuheben. In solchen Gewebeproben bleiben auch die Gene des Tieres erhalten. Dieses Genmaterial könnte dazu beitragen, die genetische Vielfalt von bedrohten Populationen einer Art zu bewahren, vielleicht sogar zu bereichern.

Manche im Naturschutz tätigen Biologen können sich selbst mit inzwischen grundlegenden Verfahren einer „gestützten Fortpflanzung“ nur langsam anfreunden, etwa mit Hilfsmethoden wie einer Invitro-Fertilisation – also der Befruchtung des entnommenen Eies im Reagenzglas, das erst später einem Weibchen übertragen wird. Noch zögerlicher stehen viele Artenschützer dem Klonen als Maßnahme zum Arterhalt gegenüber. Sicher – auch wir plädieren dafür, alles zu tun, um vorrangig natürliche Lebensräume zu erhalten, Wildnisregionen für die ungeheure Vielfalt der Lebensformen. Doch leider ist diese Schlacht manchmal schon verloren, und in anderen Fällen sind die Aussichten gering, den Kampf noch zu gewinnen.

Gaure, die größten heutigen Wildrinder, sind vom Aussterben bedroht. Diese Herde spürte der Fotograf in Nepal auf. Das Klonen seltener Arten könnte einen Beitrag zum Artenschutz darstellen.



Das erste geklonte Säugetier, dessen „Mutter“ zu einer anderen Art gehört, wird voraussichtlich ein Gaur sein. Die Aufnahme dieses Bullen gelang in Indien.

NAS / T. MCHUGH / OKAPIA

Auch dann stellt Klonen zwar kein Allheilmittel dar. Aber die Technologie dürfte zumindest ermöglichen, ein paar der gefährdeten Arten zu retten, die sonst vielleicht untergingen.

Nun benötigt auch ein geklontes Säugetier noch immer eine „Mutter“, der man den Embryo einpflanzt, die ihn austrägt und zur Welt bringt. Außerdem braucht man Eizellen, in die man das Erbgut des zu klonenden Tieres einbringt. Kaum ein Artenschützer würde aber wollen, dass dafür einige der letzten wildlebenden Weibchen einer gefährdeten Art eingefangen würden. Auch die in Zoos gehaltenen wenigen Individuen sind zu wertvoll, als dass man sie der Prozedur aussetzen wollte. Es gibt nur einen Ausweg: Weibchen von einer anderen, nicht bedrohten Art zu Hilfe zu nehmen; diese Tiere können Eizellen liefern beziehungsweise die Jungen austragen. Wir und andere Wissenschaftler suchen darum nach Wegen, Klone mittels Zellen zweier verschiedener Spezies zu erzeugen, Körperzellen der bedrohten Art und Eizellen einer anderen. Außerdem soll die zweite Art die Leihmütter stellen.

Zellen von zwei Tierarten für einen Klon

Die beiden verschiedenen Zellen zu vereinigen, wirkt äußerlich ganz einfach (siehe Zeichnungen auf der nächsten Doppelseite). Mit einer Hohlnadel muss man die äußere, schützende Glashaut des Eies durchstechen, das sich Stunden vorher noch in einem lebenden Eierstock befand. Dann saugt man damit den so genannten Polkörper und die Chromosomen heraus. Somit beraubt man die Eizelle ihres Kerns und damit fast all ihres Erbmaterials. Zurück bleibt ein Sack voller Zellplasma. Ein wenig Erbmaterial enthalten nun nur noch die Mitochondrien – Zellorganellen, die zur Zellatmung dienen. Jetzt injiziert man mit einer zweiten Hohlnadel eine ganze speziell kultivierte Körperzelle des Tiers, das geklont werden soll, unter die Glashaut des entkernten Eies. Ein sanfter Stromstoß sorgt anschließend dafür, das die beiden Zellen miteinander verschmelzen. Damit ist der Prozess des Klonens abgeschlossen. Das neue Gebilde, ein „früher Embryo“, beginnt sich bald darauf zu teilen.

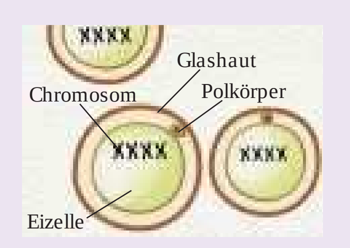
Im Idealfall bildet sich in den nächsten Tagen eine so genannte Blastocyste, ein frühes Embryonalstadium mit vielleicht hundert Zellen, das weit genug entwickelt ist, um es in die Gebärmutter eines Ersatzmuttertieres verpflanzen zu können. Zuvor wurde dieses Weibchen auf seine Rolle hormonell eingestimmt.

Doch in der Praxis erweist sich ein solcher „Kerntransfer“ – wie die Wissenschaftler die Technik bezeichnen – alles andere als leicht. Unser Gaur-Projekt beschrieben wir kürzlich in der Wissenschaftszeitschrift „Cloning“. Das Kalb Noah blieb als einziger von 692 Klonen übrig, die wir bei Advanced Cell Technology (ACT) in Worcester (US-Bundesstaat Massachusetts) aus Hautzellen eines Gaur-Bullen und entkernten Eizellen von Kühen erzeugten. Denn von den fast 700 frühen Embryonen entwickelten sich überhaupt nur 81 bis zu implantierbaren Blastocysten. 42 von diesen Embryonen konnten wir schließlich auf 32 Kühe übertragen. Von diesen behandelten Kühen wurden wiederum nur acht trächtig. Zwei der Feten entnahmen wir für wis- ▶

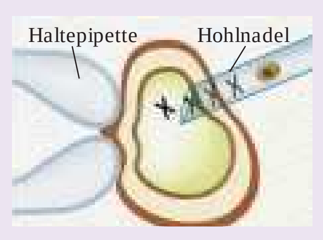
SLIM FILMS (GRAFIK), ROLAND SEITRE / PETER ARNOLD, INC. (GAUR), JOHN CANCALOSI / PETER ARNOLD, INC. (STEINBOCK)



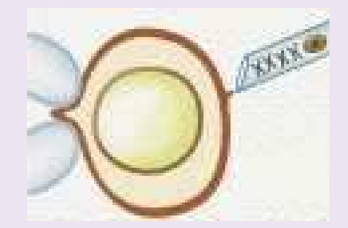
Wie man durch Kerntransfer einen Klon erzeugt



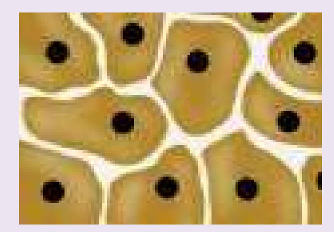
Eizellen, die fremdes Erbmaterial aufnehmen sollen, gelangen im Labor zur Reifung. Jede Eizelle enthält noch einen Polkörper, eine Restzelle von der Reifeteilung.



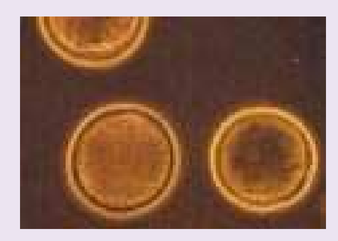
Der Polkörper und die Chromosomen der Eizelle werden in eine Hohlnadel aufgesaugt. Eine andere Pipette hält dabei das Ei in der Position fest.



Die Chromosomen der Eizelle und der Polkörper sind entfernt worden. In der Eihülle, der Glashaut, bleibt nur Zellplasma (Cytoplasma) zurück.



Von dem Tier, das geklont werden soll, werden Hautzellen gewonnen und in Kultur genommen, und zwar „Fibroblasten“, Bildungszellen für Bindegewebe.









senschaftliche Untersuchungen. Von den restlichen sechs Kühen hatten vier im zweiten oder dritten Monat der Trächtigkeit, die etwa neun Monate dauern sollte, einen Spontanabort. Eine weitere Kuh verlor das Kalb völlig unerwartet im letzten August im Spätstadium der Schwangerschaft.

Die geringe Erfolgsquote macht wieder einmal nur allzu deutlich, dass beim Klonen bisher ebenso viel Glück und Forschergeschick wie Wissenschaft im Spiel ist. Das gilt ganz besonders, wenn der Embryo in eine fremde Art eingepflanzt werden soll. Die beste Statistik erzielen andere Forscher und wir von ACT bisher mit dem Klonen von Hausrindern. Aber selbst in diesem Fall, bei dem Embryo und Leihmutter zur selben Art gehören, entwickeln sich von hundert frühen Embryonen nicht mehr als fünfzehn bis zwanzig zu Blastocysten. Und von denen entsteht nur etwa aus jedem zehnten ein lebend geborenes Kalb. Das bedeutet: Aus hundert erzeugten Klonen gewinnen wir nur ein oder zwei Kälber.

Die Schwierigkeiten rühren einerseits von Problemen beim Kerntransfer her. Wir hoffen, dass wir die Gründe dafür bald verstehen. Andererseits ist aber auch die Technologie der „gestützten Reproduktion“ noch nicht genügend ausgereift.

Wir erwarten deswegen, dass die ersten Klone bedrohter Tiere von Arten mit gut erforschtem Fortpflanzungssystem stammen werden. Verschiedene Zoos und Naturschutzgesellschaften befassen sich bereits mit der Fortpflanzungsphysiologie einer Reihe bedrohter Arten. Auch unsere Arbeitsstelle, das Zentrum zur Erforschung bedrohter Arten am Audubon-Institut (AICRES) in New Or-



ROLAND SEITRE / PETER ARNOLD, INC.

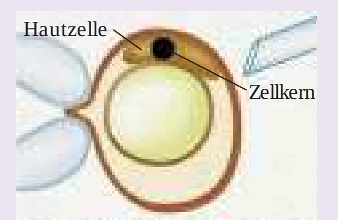


AGE / MAURIMIT



Von den kultivierten Hautzellen saugt man eine ganze Zelle in eine Hohlnadel. Damit sticht man nochmals durch die Glashaut des entkernten Eies.



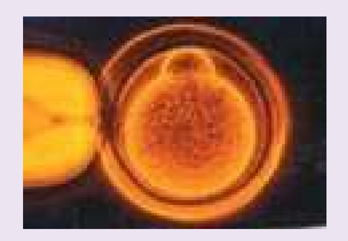


Die Hautzelle wird nun unter die schützende Glashaut des kernlosen Eies eingebracht. Sie bleibt aber noch von dessen Zellplasma getrennt.





Anschließend bewirkt ein leichter Stromstoß, dass die injizierte Hautzelle und das Cytoplasma der Eizelle miteinander verschmelzen.





Der neue Zellkern samt genetischem Material wandert ins Eizell-Cytoplasma. Binnen weniger Stunden beginnt sich die verschmolzene Zelle zu teilen.



GRAFIK: LAURIE GRACE; FOTOS: PHILIP DAMIANI

leans beteiligt sich daran. Wir haben einige beachtliche Erfolge vorzuweisen. So brachte vor einem Jahr eine Hauskatze eine lebende Afrikanische Wildkatze zur Welt. Dem Muttertier hatten wir einen vorher eingefrorenen Embryo der teils gefährdeten Wildkatze eingepflanzt.

Außer bei dieser Wildkatze und beim Gaur gelang anderen Forschern und uns in vier weiteren Fällen ein Embryotransfer auf eine fremde Art:

- Eine Hauskatze war Leihmutter für eine indische Wüstenkatze;
- eine Elenantilope, ein in Afrika häufiges Huftier, trug einen Bongo aus, eine der seltensten Antilopen;
- ein Hausschaf gebar ein Mufflon;
- ein Weißwedelhirsch, der in Nordamerika lebt, einen Rothirsch, der ebenfalls in der Neuen Welt vorkommt.

Von allen vier Arten erhielten wir lebende Junge – wohlgemerkt nicht Klone.

Vielleicht helfen die Erfahrungen mit den Katzenarten, eines Tages Geparden zu klonen. Von ihnen leben im südlichen Afrika allenfalls noch zwölftausend. Um sich zu paaren, brauchen diese schnellen Jäger ein ausgedehntes Territorium, wohl einer der Gründe, warum Geparden in Gefangenschaft so selten Nachwuchs haben. Der erhebliche Gebietsanspruch lässt umso mehr fürchten, dass diese Katze bei einer weiteren Verkleinerung ihres Lebensraums ausstirbt.

Eine der spektakulärsten Arten für die neue Arche Noah wäre der Große Panda, das Emblem des WWF (World Wide Fund For Nature). Von dieser Bärenart leben in den Bambuswäldern Chinas vermutlich noch höchstens tausend Tiere, auch wenn die Bestände sich in den letzten Jahren vielleicht stabilisiert ▶



ANUP SHAH / OKAPIIA

Um gefährdete Säugerarten vor dem Aussterben zu retten, könnten andere Arten einspringen – so die Vision. Kühe als Leihmütter werden geklonte Gaure (ganz links) zur Welt bringen. Elenantilopen (links) werden Bongos (unten) gebären.



CHARLES V. ANGELO / PHOTO RESEARCHES, INC.

Anmerkungen eines Verhaltensbiologen

Fatale Folgen für die Anpassungsfähigkeit

Die in diesem Artikel vorgestellten Befunde sind zwar in der Tat beeindruckend. Gefährdete Tierarten zu klonen ist in einigen Spezialfällen sicher auch gerechtfertigt. Aus Sicht eines Verhaltensbiologen, der viel mit Zoos, Erhaltungszuchtprogrammen und deren Organisationen zu tun hat, seien dazu jedoch ein paar kritische Bemerkungen erlaubt.

Der erste Einwand betrifft das von den Autoren am Beispiel des Geparden dargelegte Problem. Die einschlägigen Gremien der europäischen Zoo-Assoziation, wie die Elefanten- und Nashornberatungsgruppen, betonen stets, dass gestützte Reproduktion – etwa durch künstliche Besamung – kein Ersatz für natürliche Vermehrung sein darf und schon gar kein Hilfsmittel bei unzureichender Haltung.


M. NICHOLS / NGS / PREMIUM

Auch Antilopen – wie diese Bongos – lernen vieles erst durch Artgenossen.

Die Zucht von Geparden ist möglich. Viele Zoos und Zuchtzentren zeigen dies. Das langwierige Werbeverhalten und die dazu nötigen großen Territorien stellen einen wichtigen Teil der natürlichen Partnerwahl des Geparden dar. Diese Ansprüche der Tiere gewissermaßen auszuhebeln, könnte sich auf die Anpassungsfähigkeit der erzeugten Jungtiere auf lange Sicht nachteilig auswirken. Stattdessen sollte man sich eben um bessere Haltungsbedingungen bemühen!

Tiergärtner wissen heute, dass es keine selektionsfreie Erhaltungszucht geben kann. Früher versuchten sie, möglichst alle Grundtiere „ohne Ansehen des Einzelnen" in gleichem Maße zu vermehren, um eine möglichst große genetische Vielfalt zu erhalten. Die Erfahrung spricht aber dagegen. Darum plädieren Tiergärtner nun für ein „life-history-management", das auch verhaltensbiologische, ökologische und andere lebensgeschichtliche Anpassungen und Anpassungsprozesse berücksichtigt. Das bedeutet zwar Chancengleichheit, aber nicht Gleichmacherei. Chancengleichheit heißt: Ein Tier erhält, soweit im Zoo machbar, die Möglichkeit zur arttypischen Partnerwahl. Auch sollten die Aufzuchtbedingungen für den Nachwuchs der Situation von natürlichen Populationen in möglichst vieler Hinsicht ähneln. Das berührt den zweiten Kritikpunkt: Interspezifisches Klonen – Klonen mit Beteiligung von zwei verschiedenen Arten – wird gravierende verhaltensbiologische Probleme aufwerfen.

Bei Säugetieren tragen Lern-, Prägungs- und Sozialisationsvorgänge erheblich zum individuellen Verhalten bei. Dies haben Verhaltensbiologen vielfach belegt. Die Anpassungsfähigkeit des erwachsenen Individuums an seine Umwelt hängt von diesen Prozessen entscheidend ab. Nahrungsprägung etwa ist nicht nur bei einigen Kleinraubtieren zweifelsfrei nachgewiesen (so bei dem stark bedrohten nordamerikanischen Schwarzfußiltis); sondern sie findet offenbar auch bei vielen anderen Säugerarten statt. Bisher wissen wir dies unter anderem von vielen Mäuseartigen und von einigen Huftieren, etwa von Ziegen und Schwarzwedelhirschen.

Der vom Aussterben bedrohte Bongo, der geklont werden soll, bewohnt dichte Regen- und Bergwälder. Die Elenantilope, die dazu die Leihmütter liefern soll, lebt aber in der Savanne. Eine Blatt- und Knospenfresserart wie der Bongo kann sicher durch eine Savannenart nicht aufgezogen werden, ohne dass dies erhebliche Auswirkungen auf seine spätere Nahrungsauswahl haben dürfte. In ähnlicher Weise werden offenbar Habitatbevorzugungen, Artgenossen- und Sozialpartnerschemata weitergegeben – man denke an die Probleme mit handaufgezogenen Rehböcken, die später je nach Art der Aufzucht Menschen, Rehe oder beide angreifen.

Noch viel mehr Schwierigkeiten wird die Sozialisation bereiten, die Entwicklung des Sozialverhaltens. Man weiß heute, wie sehr sich schon der Hormon- und Belastungsstatus der Mutter während der Trächtigkeit auf das spätere Verhalten auswirkt. Vielfach entscheidet die Bindung an die Mutter bald nach der Geburt, zu welcher Art ein Tier sich zugehörig fühlt. Auch arteigene gleichaltrige Spielkameraden üben in vielem einen beträchtlichen Einfluss aus. Ebenfalls macht sich bemerkbar, ob während der Aufzucht beispielsweise Kontakt zu einem erwachsenen männlichen Artgenossen besteht. Studien aus dem Freiland belegen sogar, dass Tiere derselben Art in verschiedenen Populationen nicht nur anderes Futter wählen – was mit dem Verhalten der Mutter korreliert – sondern auch unterschiedliches Sozial- und Aktivitätsverhalten zeigen. Die meisten dieser Befunde stammen keineswegs von hochkomplexen Menschenaffen oder wenigstens rudellebenden Großraubtieren, sondern von so kommunen Tierarten wie Meerschweinchen, Wildschafen, Feldmausarten oder eben Ziegen und Hirschen.

All das ist zu berücksichtigen, wenn man den Einsatz von Reproduktionstechnologien im Artenschutz erwägt. Künstliche Besamung, Embryotransfer und vielleicht auch Klonen mit einer Leihmutter derselben Art können ermöglichen, über Länder- und Kontinentgrenzen hinweg Zuchtprogramme auf breiter genetischer Basis zu vollziehen, ungehindert von Veterinärvorschriften. Mit Hilfe solcher Techniken ließe sich bei Zuchtprogrammen etwa auch das Erbmaterial von solchen Wildfängen mit einbeziehen, die sich bisher in der Gefangenschaft nicht oder kaum vermehrt haben.

Doch die Klone – oder auf natürlichem Wege entstandene Embryonen – Weibchen einer fremden Spezies zu überlassen, wäre bestenfalls als letzte Rettung von Arten mit nur noch wenigen Dutzend Vertretern überlegenswert. Dann nehme man aber bitte Empfängertiere, die mit etwas mehr Kenntnis der Biologie und Ökologie ausgewählt wurden als Milchkuh zu Gaur oder Elen zu Bongo.

Udo Gansloßer



Der Autor lehrt Zoologie, Verhaltensforschung und Tiergartenbiologie unter anderem an der Universität Erlangen und im Zoo Nürnberg. Er ist Mitglied des Forschungskomitees und mehrerer Taxon-Beratungsgruppen der European Association of Zoos and Aquaria (EAZA).



MARTIN WENDLER / PETER ARNOLD, INC.



L. ZHI / NGS / PREMIUM

Ob gefährdete Wildkatzen – wie der amerikanische Ozelot (links) – oder Bärenarten wie die Pandas (oben ein junger Großer Panda): Wahrscheinlich wird es bald möglich sein, sie zu klonen.

haben. In Zoos gelten sie als Rarität. Zwar hat bisher noch niemand versucht, Embryonen des Pandas auf Weibchen anderer Arten zu überpflanzen. Doch andere die Fortpflanzung unterstützende Maßnahmen mussten die Tiere schon über sich ergehen lassen. Ein Pandapaar des Zoos von San Diego, das allein keinen Nachwuchs zu Wege brachte, bekam nach einer künstlichen Befruchtung im August 1999 ein Baby.

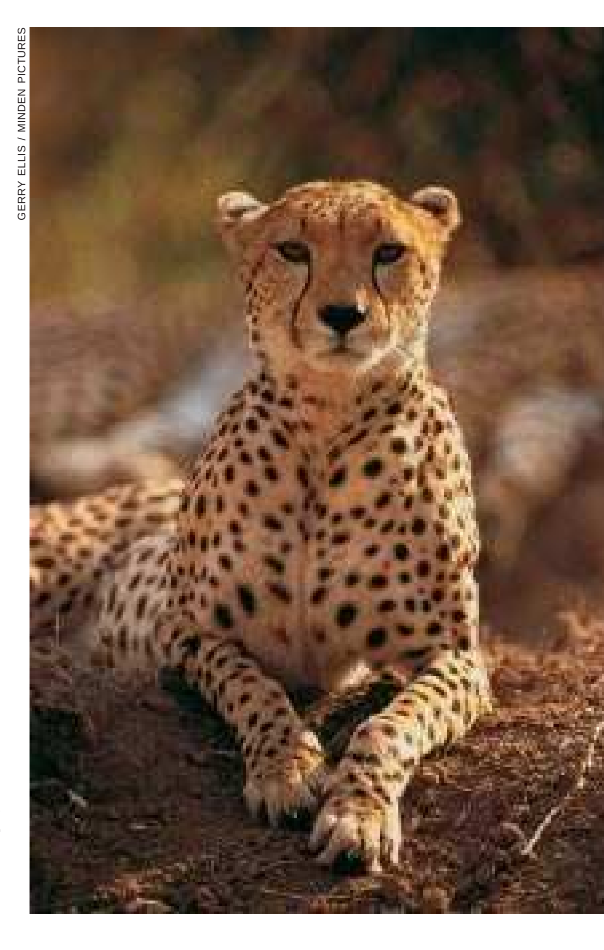
Internationale Projekte

Wir von ACT verhandeln zur Zeit mit der Regierung Chinas, den Großen Panda zu klonen. Erste Schritte dazu haben chinesische Wissenschaftler bereits unternommen. In der Augustausgabe der englischsprachigen Zeitschrift „Science in China“ von 1999 berichteten Dayuan Chen und seine Kollegen, sie hätten erfolgreich Muskel-, Gebärmutter- und Milchdrüsenzellen des Großen Pandas mit Eizellen von Kaninchen verschmolzen. Die Klone hätten sie im Labor dazu gebracht, sich zu Blastocysten zu entwickeln.

Als Leihmütter des Bambusbärs kämen Kaninchen natürlich nicht in Frage. Unsere chinesischen Kollegen und wir möchten Pandas vielmehr von amerikanischen Schwarzbärinnen austragen lassen, von denen wir Eizellen während der Jagdsaison im Herbst gewinnen. In die Eizellen möchten wir Gewebezellen eines männlichen und eines weiblichen Pandas einbringen, die im Zoo von Washington starben. Die Embryonen wollen wir einer Schwarzbärin einpflanzen. Dass sich Schwarzbärweibchen als Leihmütter eignen, haben Forscher von Bear Country USA in Rapid City (US-Bundesstaat South Dakota) bereits gezeigt. Eine Schwarzbärin brachte das Junge einer Artgenossin zur Welt, das ihr als Embryo eingepflanzt worden war. Den Befund veröffentlichten die Forscher 1999 in der Zeitschrift „Theriogenology“.

Für andere Projekte hoffen die Wissenschaftler bei AICRES, auch auf die Erfahrungen zurückgreifen zu können, die der Zoo von Cincinnati (US-Bundesstaat Ohio) mit Bongos machte. Beteiligt an dem Projekt zum Erhalt dieser Antilopenart war eine von uns (Dresser), die damals an dem Zoo beschäftigt war, außerdem Charles Earle Popevu von der Universität von Alabama in Birmingham, der jetzt bei AICRES und an der Louisiana State University arbeitet. Schon 1984 konnten wir die Geburt eines Bongokalbs vermelden, das eine Elenantilope zur Welt gebracht hatte. Die Forscher hatten einem trächtigen Bongoweibchen sehr frühe Embryonen entnommen und der Elenkuh eingepflanzt.

Am stärksten ist der Bergbongo gefährdet. Schon heute leben die meisten Tiere dieser Unterart in Menschenobhut. Laut IUCN behaupten sich nur noch ungefähr fünfzig Bergbongos in einem kleinen Gebiet in Kenia. In Vergleich dazu verzeichnete das Internationale Zuchtbuch für 1999 fast 550 Bergbongos in Zoos. Vom Tieflandbongo dürften noch mehrere Tausend Tiere in Zentral- und Westafrika existieren. Diese Unterart wird zur Zeit als „beinahe gefährdet“ eingestuft. Mehrere kenianische und amerikanische Natur- ▶



GERRY ELLIS / MINDEN PICTURES

Der Gepard gehört zu den Arten, die sich in Gefangenschaft nur unter günstigsten Bedingungen fortpflanzen. Viele der Freilandpopulationen sind vom Aussterben bedroht.

schutzorganisationen planen, Bergbongos aus Zoo-Nachzuchten in zwei Gebieten Kenias anzusiedeln. AICRES arbeitet in Kenia in einem Projekt, bei dem Bongoembryonen, die eingefroren waren, auf Elenkühe übertragen werden sollen. Auch diese Kälber könnten helfen, die Bestände zu vergrößern. Wenn wir außerdem Bongos klonen und die Klone von Leihmüttern aufziehen lassen, könnten wir die Bemühungen um den Erhalt dieser Art unterstützen.

Wie steht es aber um bereits ausgestorbene Arten? Werden wir manche von ihnen durch Klonen wieder zum Leben erwecken können? Mit Dinosauriern oder Mammuts dürfte das in absehbarer Zeit wohl kaum gelingen. Als Haupthindernis steht dem entgegen, dass es an genügend gut konservierten Geweben mit einigermaßen erhaltener DNA mangelt. Erst kürzlich wurden Forscher enttäuscht: Sie hatten gehofft, das Erbgut eines gefrorenen Mammuts aus Sibirien zu gewinnen. Doch offenbar war der Körper im Laufe der Zeit mehrfach aufgetaut und erneut eingefroren. Dadurch entstanden in den Erbsequenzen Lücken. Noch wissen die Molekularbiologen keinen Weg, diese wieder zu füllen.

Australische Forscher würden gern den Beutelwolf klonen, der in den dreißiger Jahren ausstarb. Sie kämpfen dabei mit ähnlichen Schwierigkeiten. Mitarbeiter des Australien Museum Sydney möchten Zellen eines Beuteljungen klonen, das seit 1866 in Alkohol liegt. Seine DNA ist aber in einem so schlechten Zustand, dass die Wissenschaftler praktisch alle Chromosomen rekonstruieren müssen.

Der Pyrenäen-Steinbock oder Bucardo hingegen ließe sich vielleicht wirklich wieder zum Leben erwecken. Alberto Fernandez-Arias von der Landwirtschafts-Forschungsanstalt im spanischen

Klonbanken für Hunde und Katzen

Der neue Hund soll wieder der alte sein

Schafe, Rinder, Ziegen und Labormäuse vermochten Wissenschaftler schon erfolgreich zu klonen, nicht aber gewöhnliche Katzen und Hunde. Von Katzen konnten unsere beiden Forscherteams geklonte Embryonen erzeugen und diese auch in Katzenweibchen einpflanzen, doch sie wurden bisher nicht voll ausgetragen. Das Klonen von Hunden bereitet wegen deren besonderem Fortpflanzungssystem noch mehr Schwierigkeiten.

Wir erwarten aber, dass wir diese Probleme bald meistern werden. Die Erkenntnisse lassen sich dann sicherlich auch im Artenschutz bedrohter Raubtiere einsetzen. Bei ACT wollen wir neben Heim- auch Gebrauchstiere klonen, die sich besonders bewährt haben: etwa Polizei- und Blindenhunde oder Vierbeiner, die man bei Verhaltenstherapien einsetzt. Das Audubon-Institut und die Louisiana State University möchten sich zusammen mit der Firma Lazaron BioTechnologies in Baton Rouge (US-Bundesstaat Louisiana) vor allem auf Heimtiere konzentrieren.

Erstaunlich viele Menschen können sich vorstellen, ein ihnen nahe stehendes Tier klonen zu lassen. Sie hoffen, dadurch wieder einen Vierbeiner mit ähnlichen Verhaltenseigenschaften zu erhalten. Schließlich beruht nach heutiger Auffassung ein gut Teil des Wesens von Katzen und Hunden auf genetischen Anlagen. Gegen das Klonen von geliebten Haustieren ließe sich einwenden, dass in der Welt genug Hunde und Katzen leben, die ein Zuhause gebrauchen könnten. Viele Tierliebhaber legen aber auf bestimmte Verhaltenseigenschaften Wert, welche die Züchter immer noch in altbewährter Manier durch gelenkte natürliche Fortpflanzung hervorrufen.

Klonen wäre hier eine effizientere Alternative, vor allem bei Gebrauchshunden. Derzeit werden zum Beispiel männliche Blindenhunde früh kastriert, damit sie sich besser auf das Training konzentrieren. Wenn sich ein solcher Hund später als besonders gut erweist, kann er seine Anlagen nicht mehr weitergeben.

ACT und einige andere Firmen bieten Tierärzten bereits Ausstattungen an, um Hautproben von Heimtieren zu gewinnen. Ein Labor züchtet daraus dann reine Zell-Linien, die sich zum Klonen eignen.

Die ebenfalls benötigten Eizellen gewinnen wir bei ACT aus Eierstöcken, die beim Sterilisieren von Hunden und Katzen anfallen. Sämtliche erkennbaren Follikel stechen wir an und lassen die daraus hervorgeholten Eizellen in einem speziellen Nährmedium reifen, dem wir Hormone, Proteine und Nährstoffe zusetzen. Erst die reifen Eizellen verwenden wir zum „Kerntransfer“. Dabei wird eine ihres Genmaterials beraubte Eizelle mit einer gezüchteten Zelle samt Zellkern des Tieres verschmolzen, das geklont werden soll.

Unser Hauptaugenmerk gilt bisher der Hauskatze, denn deren Fortpflanzungsbiologie ist vergleichsweise gut erforscht. So warfen Katzen bereits lebende Junge, nachdem ihnen normal entstandene Embryonen eingepflanzt worden waren. Dies gelang sowohl bei Übertragung von frühen wie späten Embryonen. Außerdem konnten unsere beiden Forschergruppen Kultursysteme etablieren, um Katzen-Eizellen im Labor zur Reifung zu bringen. Wir können von Katzen inzwischen auch zuverlässig geklonte Embryonen produzieren, die in Empfängertiere eingepflanzt werden.

Hunde bereiten bisher wesentlich mehr Schwierigkeiten, denn ihre Fortpflanzungsphysiologie ist innerhalb der Säuger recht einmalig. Die Eier sind bei der Ovulation noch so unreif, dass sie danach eine sehr lange Reifungszeit benötigen. Das System, das wir für Katzeneier verwenden, können wir hier deswegen nicht gebrauchen. Eine andere Folge ist, dass wir am Ende über erheblich weniger Eier verfügen. Die Katzen werden den Hunden um einige Schnauzenlängen voraus sein – beim Klonen.

ROB MCEWAN / PHOENIX PICTURES



KLEIN / HOBERT / BIOS / PETER ARNOLD, INC.

Bald sollen Tierliebhaber einen Klon ihres verstorbenen Hausgenossen bestellen können.

Saragoza, der Gewebe der letzten Bucardogeiß einfror, kämpfte wie sein Kollege José Folch jahrelang um die letzten dieser Steinböcke. Dennoch wurde der kleine Bestand durch Wilderei, Zerstörung seines Lebensraums und Bergrutsche ausgelöscht. Vor zwei Jahren gelang es den spanischen Forschern, Embryonen einer anderen Unterart des Spanischen Steinbocks in eine Hausziege zu verpflanzen, die auch tatsächlich lebende Junge warf.

Um den Pyrenäen-Steinbock zu klonen, will ACT mit den Spaniern zusammenarbeiten. Doch aus den vorhandenen Zellproben können wir natürlich allenfalls genetisch identische Weibchen erhalten. Wir planen deswegen, männliche Zellen eigens herzustellen: Dazu wollen wir einer vorhandenen weiblichen Zelle eines ihrer beiden X-Chromosomen entnehmen und dieses durch ein Y-Chromosom eines nah verwandten Steinbocks ersetzen. Für den Menschen wurde für solche Manipulationen an den Chromosomen eine Technik entwickelt, bei der man künstliche „Mikrosomen“ verwendet. Zum Klonen hat dieses Verfahren bisher aber niemand eingesetzt. Eine eigens gegründete Sponsororganisation, die „Soma Foundation“, unterstützt das Vorhaben.



Der Pyrenäen-Steinbock oder Bucardo starb vor kurzem aus. Man könnte ihn aber noch klonen: mit Hilfe eingefrorener Zellen des letzten Tiers.

Klone aus dem Tiefkühlzoo

Das Klonen gefährdeter Arten bietet immer noch Anlass zu Kontroversen. Wir vertreten die Ansicht, dass diese Methode neben anderen Anstrengungen um den Erhalt gefährdeter Arten ihren Platz hat. Einige Forscher halten dagegen, Klonen würde die ohnehin schwindende genetische Vielfalt solcher Arten noch weiter einschränken. Das sehen wir anders. Wir plädieren dafür, soweit als möglich von allen Individuen gefährdeter Arten Gewebeproben einzufrieren und in einem weltweiten Netz verfügbar zu halten. Viele Tiergärten haben bereits „Tiefkühlzoos“ mit Sperma und Eizellen von Insassen eingerichtet. Ähnlich könnte eine Sammlung von Körperzellen ein genetisches Guthaben darstellen, aus dem sich ganze Populationen wieder aufbauen lassen. Erschwinglich wäre dies allemal. Leider unterhalten bisher nur zwei Stellen solche Zellbanken: AICRES und das Zentrum zur Reproduktion gefährdeter Arten (CRES) am Zoo San Diego.

Andere Kritiker befürchten, die Bemühungen um den Erhalt der Lebensräume von bedrohten Arten würden in den Hintergrund gedrängt, wenn die Tiere geklont werden können. Auch wir halten den Lebensraumschutz für das Fundament zum Artenerhalt. Nur sind manche Länder einfach so arm und die Verhältnisse mancherorts so instabil, dass diese Regionen dauerhafte Schutzmaßnahmen einfach nicht durchsetzen können. Überdies wird wahrscheinlich auch einigen anderen heute noch nicht unmittelbar gefährdeten Arten wegen der wachsenden Weltbevölkerung irgendwann nicht mehr genug Lebensraum bleiben. Wenn wir solche Tiere mit Hilfe anderer Arten durch interspezifischen Kerntransfer klonten, ließe sich dennoch ein umfangreicher Genpool bewahren. Entsprechend große Populationen in Gefangenschaft zu erhalten, die eine ausreichende genetische Mannigfaltigkeit gewährleisten, wäre besonders bei großen Tieren sehr kostenträchtig.

Manche Gegner befürchten, unser Vorhaben könnte Spendengelder von Artenschutzprojekten abziehen, die für den Erhalt der Lebensräume kämpfen. Aber nicht jeder potenzielle Spender möchte Bemühungen unterstützen, die Lebensraumzerstörung abzuwehren. Wir sollten berücksichtigen, dass Menschen, die für Artenschutz um jeden Preis kein Geld aufbringen würden, das Klonen oder andere Methoden künstlicher Fortpflanzung vielleicht gern fördern. – Es ist Zeit zum Handeln. ■

Robert P. Lanza, Betsy L. Dresser *und* ***Philip Damiani*** *erforschen die Fortpflanzungsbiologie von Tieren. Lanza ist Vizepräsident für medizinische und wissenschaftliche Entwicklung beim ACT, „Advanced Cell Technology“, in Worcester (Massachusetts). Dresser ist Vizepräsidentin für Forschung am Audubon-Institut in New Orleans (Louisiana). Sie leitet AICRES, das dortige Zentrum für Forschung an bedrohten Tieren, und das Arterhaltungs-Zentrum Freeport-McMoRan in Audubon. Damiani forscht bei ACT.*

Literaturhinweise

Klonen für medizinische Zwecke.Von Ian Wilmuth in: Spektrum der Wissenschaft, April 1999, S. 34.

Biodiversity Hotspots for Conservation Priorities. Von N. Myers et al. in: Nature, Bd. 403, S. 853. 24. Febr. 2000.

Preservation of Endangered Species and Populations: A Role for Genome Banking, Somatic Cell Cloning, and Androgenesis? Von G. E. Corley-Smith & B. P. Brandhorst in: Molecular Reproduction and Development, Bd. 53, Heft 3, Juli 1999, S. 363.

Weblinks finden Sie unter ***www.spektrum.de/aktuelleshеft.html***

Die Suche nach erdähnlichen Planeten

Außerhalb unseres Sonnensystems haben Astronomen bereits Dutzende von Riesenplaneten ausfindig gemacht. Inzwischen sind ihre Messmethoden ausgefeilt genug, um auch extrasolare Himmelskörper von der Größe unserer Erde zu entdecken.

VON LAURANCE R. DOYLE, HANS-JÖRG DEEG UND TIMOTHY M. BROWN

Einen Planeten, der nicht um unsere Sonne, sondern um einen fernen Stern kreist, hat noch kein Mensch direkt gesehen. Aber im November 1999 erhaschten zwei Astronomen immerhin den Schatten eines solchen Trabanten. David Charbonneau, Doktorand an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts), analysierte die Helligkeit des sonnenähnlichen Sterns HD 209458 anhand von Daten, die er gemeinsam mit einem von uns (Brown) erhoben hatte. Fast zur gleichen Zeit beobachtete Greg Henry, Astronom an der Tennessee State University in Nashville, denselben Stern.

HD 209458 ist ein unauffälliger Stern im Sternbild Pegasus; nicht einmal mit bloßem Auge ist er zu sehen. Der Himmelskörper zeichnet sich jedoch durch eine Besonderheit aus: Um ihn kreist ein Planet, der mindestens zwei Drittel der Masse Jupiters aufweist. Zumindest war das damals der Kenntnisstand der Astronomen. Denn der Planet war bisher nur indirekt anhand der winzigen Geschwindigkeitsschwankungen nachgewiesen worden, die er seinem Zentralgestirn aufzwingt. Charbonneau und Henry wollten sich nun auf eine andere Art Gewissheit verschaffen: Könnte es nicht sein, fragten sich die Beobachter, dass der Planet von der Erde aus gesehen gelegentlich vor dem Stern vorbeizieht und ihn dabei teilweise abschattet? Die Helligkeit des Sterns müsste dann auf markante Weise abnehmen.

Damit ein solches Ereignis – von den Astronomen Durchgang oder Transit genannt – beobachtet werden kann, darf die Umlaufbahn des Planeten nur wenig zu unserer Sichtlinie geneigt sein. Dies ist durchaus nicht so unwahrscheinlich, wie man zunächst vermuten könnte. Die Chance für die „richtige“ Ausrichtung beträgt bei Planeten, die sich wie der Begleiter von HD 209458 auf einer engen Umlaufbahn um ihren Zentralstern bewegen, etwa zehn Prozent. Als Charbonneau und Henry ihre Beobachtung durchführten, waren die meisten anderen extrasolaren Planeten bereits auf Durchgänge überprüft worden – jedoch ohne Erfolg. Einige Astronomen fragten sich deshalb, ob dieser negative Befund nicht die Existenz extrasolarer Planeten generell in Frage stelle: Vielleicht hatte man ja die vermeintlichen Geschwindigkeitsschwankungen falsch interpretiert, und sie waren in Wirklichkeit nur Schwingungen eines Sterns, der seinen Radius rhythmisch ändert?

Charbonneaus und Henrys Untersuchungen beseitigten diese Zweifel. Genau zu dem Zeitpunkt, zu dem nach den Geschwindigkeitsmessungen ein Durchgang hätte erfolgen können, nahm die



Ein erdähnlicher Planet umkreist womöglich das Doppelsternsystem CM Draconis. Die Autoren haben eine geringe, sich rhythmisch wiederholende Abnahme des Sternenlichts registriert – verursacht vermutlich von einem vorüberziehenden Planeten.

MARK A. GARLICK

Helligkeit des Sterns für drei Stunden um 1,8 Prozent ab. Dieses leichte Verblassen bewies nicht nur die tatsächliche Existenz des Planeten, sondern erlaubte auch, dessen Durchmesser zu berechnen: Man fand das 1,3fache des Jupiter-Durchmessers. Damit war erstmals die Größe eines extrasolaren Planeten bestimmt worden.

Mit der Transitmethode verfügen die Astronomen nun über ein zweites Verfahren zum Aufspüren ferner Planeten. Die ersten Erfolge brachten Messungen der Geschwindigkeitsschwankungen der Sterne. Hat ein Stern einen planetaren Begleiter, dann liegt der Schwerpunkt des Systems nicht im Zentrum des Sterns, sondern etwas abseits davon. Mit anderen Worten: Er eiert. Von der Erde aus lassen sich diese rhythmischen Verschiebungen, die der Bewegung des Sterns im Raum überlagert sind, anhand der Änderungen der Radialgeschwindigkeit feststellen. Bewegt sich der Stern auf die Erde zu, dann erscheinen seine Spektrallinien zu kürzeren Wellenlängen verschoben; entfernt er sich von ihr, verschieben sie sich zu größeren Wellenlängen. Erstmals wurde auf diese Weise 1995 ein Planet um den sonnenähnlichen Stern 51 Pegasi entdeckt. Seitdem haben die Astronomen mehr als fünfzig weitere Planeten gefunden. Diese Radialgeschwindigkeitsmethode kann grundsätzlich bei jedem Stern angewandt werden, doch vermag sie nur solche Planeten aufzuspüren, die eine große Masse haben. Trabanten von Erdgröße lassen sich damit nicht nachweisen. Aber auch die Transitmethode hat einen Nachteil: Sie lässt sich nur anwenden, wenn Stern, Planet und Erde zufällig in einer Linie stehen. Wenn aber ein Durchgang beobachtet wird, können die Astronomen auch die Größe und andere Eigenschaften des Planeten bestimmen, selbst wenn er recht klein ist.

Somit ist die Transitmethode derzeit das einzige Verfahren, mit dem man extrasolare Planeten auch von der Größe unserer Erde ausfindig machen kann. Zwei von uns (Doyle und Deeg) haben mit dieser Methode das Sternsystem CM Draconis nach erdähnlichen Welten abgesucht. Dort könnten wir Himmelskörper mit dem nur 2,5fachen Durchmesser der Erde registrieren. Die Suche nach anderen Welten – die möglicherweise auch Leben in der uns bekannten Form beherbergen – hat somit begonnen.

Der Durchgang eines Himmelskörpers vor einem Stern ist kein neues Phänomen. Schließlich ist eine Sonnenfinsternis im Prinzip nichts anderes als der Vorübergang des Mondes vor der Sonne. Anfang des 17. Jahrhunderts sagte Johannes Kepler Durchgänge des innersten Planeten Merkur vor der Sonnenscheibe voraus. Der Seefahrer James Cook hatte auf seiner ersten Südseereise den Auftrag, den für 1769 erwarteten Durchgang der Venus zu beobachten. Die damaligen Astronomen nutzten dieses Ereignis, um trigonometrisch die Entfernung der Erde zur Sonne zu berechnen. Dass Durchgänge auch vor anderen Sternen zu beobachten sein müssten, erwähnte zuerst Otto Struve vom Yerkes-Observatorium 1951. Frank Rosenblatt von der Cornell-Universität in Ithaca (New York) und William Borucki vom Ames-Forschungszentrum der Nasa in Huntsville (Alabama) haben diese Idee später weiterverfolgt.

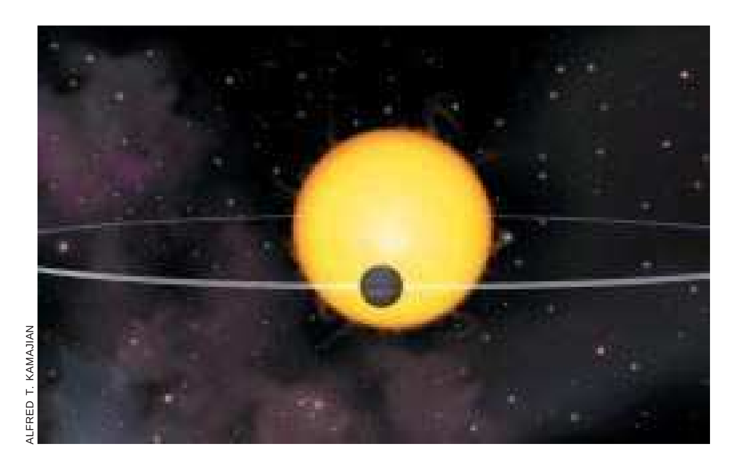
Bei einem Durchgang von Merkur oder Venus wandern diese Planeten als kleine schwarze Flecken über die Scheibe der Sonne. Durchgänge extrasolarer Planeten können dagegen nur indirekt anhand der Lichtkurve des zugehörigen Sterns festgestellt werden. In einem solchen Diagramm ist die gemessene Helligkeit als Funktion der Zeit aufgetragen. Das Messen der stellaren Lichtstärke ist Gegenstand einer astronomischen Spezialdisziplin, der Fotometrie. Das unbewaffnete menschliche Auge kann erkennen, wenn ein Stern seine Helligkeit um den Faktor 2,5 ändert. Geübte Amateurastronomen, die regelmäßig die Hellig-

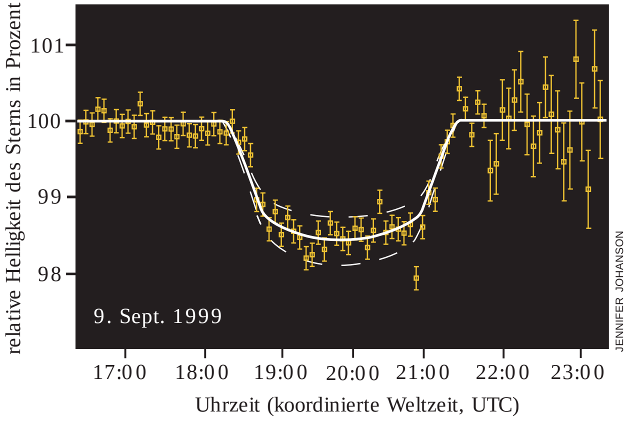
Steckbrief

Bisherige Erfolge:
Mit spektroskopischen Verfahren können Astronomen feststellen, ob sonnennahe Sterne von Riesenplaneten umkreist werden. Zahlreiche Trabanten von etwa Jupitergröße wurden in den letzten fünf Jahren gefunden.

Probleme:
Die Methode versagt jedoch bei Planeten kleinerer Masse. Trabanten von der Größe unserer Erde – auf denen sich möglicherweise Leben entwickelt haben könnte – lassen sich somit nicht aufspüren.

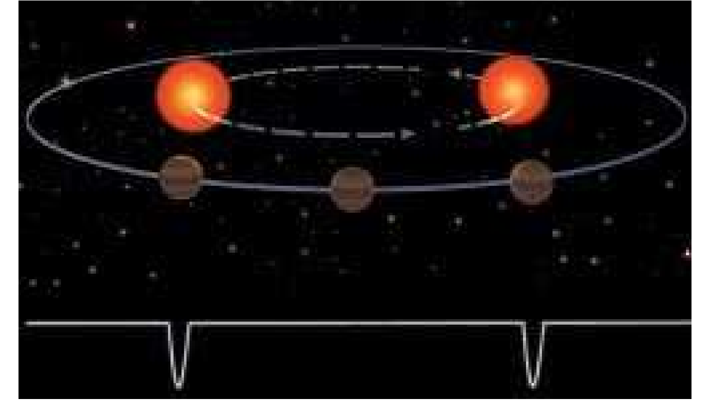
Trickreiche Lösung:
Ein anderes Verfahren – das Beobachten von Durchgängen der Planeten vor der Scheibe ihres Zentralsterns – erlaubt es, auch erdähnliche Himmelskörper nachzuweisen.


ALFRED T. KAMAJIAN

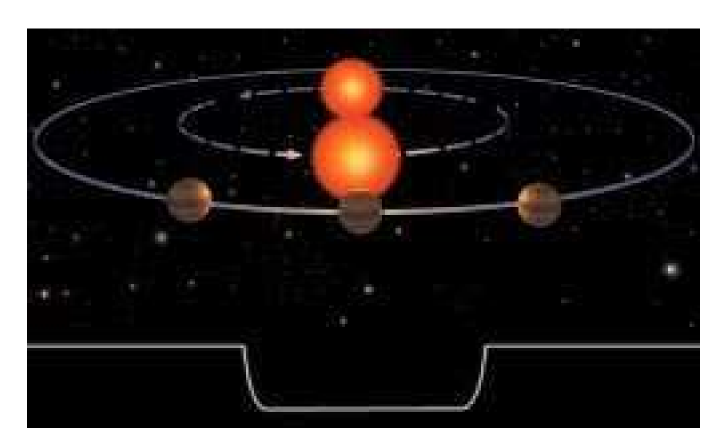


Ist die Bahnebene eines Planeten nur wenig gegen die Sichtlinie des Beobachters geneigt, so zieht der Himmelskörper regelmäßig vor der Scheibe seines Zentralsterns vorbei (links). Die gemessene Helligkeit des Sterns verringert sich dann in dem entsprechenden Rhythmus. So wurde an dem sonnenähnlichen Stern HD 209458 eine Abnahme der Helligkeit um 1,8 Prozent registriert. Die Lichtkurve (rechts) deutet auf einen Planeten mit 1,4 Jupiterdurchmessern hin (durchgezogene Linie); innerhalb der Messgenauigkeit könnte der Durchmesser auch zehn Prozent größer oder kleiner sein (gestrichelte Linien). Die Messfehler der Beobachtung (Punkte mit senkrechten Fehlerbalken) nehmen nach dem beobachteten Durchgang zu, da der Stern dem Horizont nahe kam. Neue Mehrfarbenbeobachtungen weisen auf eine Größe von 1,6 Jupiterdurchmessern hin.

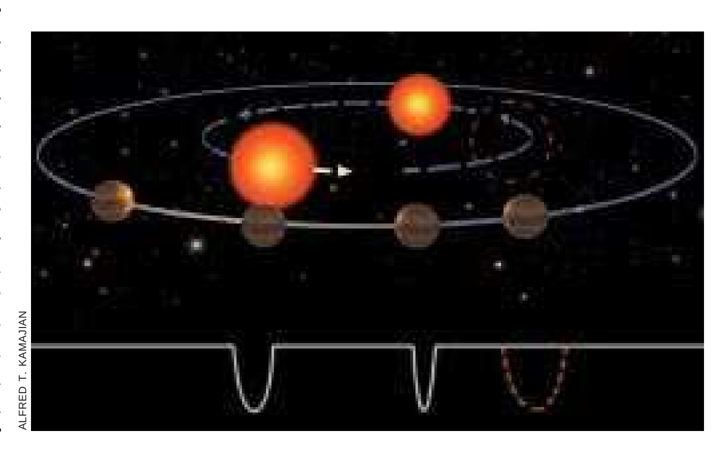
Die Lichtkurve eines Doppelsternsystems weist charakteristische Einsenkungen auf, wenn es von einem Planeten umkreist wird. Betrag und Dauer der Helligkeitsabnahme hängen von der Stellung der Sterne in ihrem gegenseitigen Umlauf ab.



Hier ist der scheinbare Abstand der Sterne am größten. Der Planet macht einen Doppeldurchgang: Er zieht erst vor dem einen, dann vor dem anderen Stern vorbei.



Wenn der Planet vorbeizieht, während sich die Sterne gegenseitig bedecken, kann der Durchgang länger dauern und eine größere Helligkeitsabnahme verursachen.



ALFRED T. KAMAJIAN

Wenn die Bewegung des Planeten langsamer ist als die der Sterne, können dreifache Durchgänge auftreten: Zuerst zieht der Planet vor dem uns näheren Stern vorbei, dann tritt ein kürzerer Durchgang vor dem ferneren Stern auf (kürzer deshalb, weil dieser sich in der Gegenrichtung bewegt), und schließlich holt der Planet den ersten Stern wieder ein (gestrichelter Umriss).

keit veränderlicher Sterne mit derjenigen benachbarter Sterne vergleichen, können wesentlich feinere Schwankungen feststellen. Mit elektronischen Kameras an kleinen Fernrohren vermag man eine Genauigkeit von 0,1 Prozent zu erzielen. Großteleskope, die mehr Licht einfangen und atmosphärische Störungen besser herausfiltern können, erreichen noch bessere Resultate.

Fotometrische Messungen sind vor allem bei der Suche nach kleinen Planeten anderen Verfahren überlegen. Das Messsignal – die zeitweilige Abnahme der Sternhelligkeit – ist proportional zur verdunkelten Fläche des Sterns und hängt somit vom Verhältnis der Quadrate des Planetenradius und des Sternradius ab. Im Gegensatz dazu variiert die Radialgeschwindigkeit eines Sternes proportional zum Verhältnis der Masse des Planeten zur Masse des Sterns – also proportional zum Verhältnis der dritten Potenzen ihrer Radien. Da Planeten bedeutend kleiner sind als Sterne (der Radius von Jupiter ist etwa zehnmal kleiner, der Erdradius gar hundertmal kleiner als derjenige der Sonne), wirkt sich diese unterschiedliche Abhängigkeit zu Gunsten der Transitmessungen aus.

Ein Beispiel mag das verdeutlichen: Um den Durchgang des Planeten vor HD 209458 mit einem Fotometer zu registrieren, reichen im Prinzip etwa 40 000 Photonen aus. Um denselben Himmelskörper über die Schwankungen der Radialgeschwindigkeit anhand des Spektrums nachzuweisen, wären rund 10 Millionen Photonen erforderlich. Deswegen können mit der fotometrischen Methode kleinere Teleskope verwendet werden, um einen Planeten einer bestimmten Größe zu finden. Ein Himmelskörper von Jupiters Größe schwächt die Helligkeit seines Zentralsterns um etwa ein Prozent, was gut mit einem Ein-Meter-Teleskop zu registrieren ist. Ein Planet von Erdgröße vermindert die Helligkeit jedoch nur um 0,01 Prozent, was die Fähigkeiten selbst der größten gegenwärtig verfügbaren Teleskope überfordert. Lediglich mit Hilfe einiger technischer Kunstgriffe ist die benötigte Präzision zu erreichen.

Der Abstand eines Planeten von seinem Stern spielt ebenfalls eine Rolle. Die Empfindlichkeit der Radialgeschwindigkeitsmessung nimmt in dem Maße ab, mit dem die Anziehungskraft zwischen beiden Himmelskörpern kleiner wird, also mit der Quadratwurzel ihrer Entfernung. Dies ist der Grund dafür, warum die meisten auf diese Weise gefundenen Planeten jupiterähnliche große Trabanten auf engen Umlaufbahnen sind. Durchgänge hingegen können registriert werden, egal wie weit der Planet von dem Stern entfernt ist. Es kommt nur darauf an, dass die geometrischen Voraussetzungen erfüllt sind: Stern, Planet und der irdische Beobachter müssen in einer Linie stehen.

Allerdings ist die Chance, einen Durchgang zu beobachten, umso geringer, je größer die Umlaufbahn des Planeten ist. Beispielsweise beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass für einen willkürlich positionierten außerirdischen Beobachter ein Transit der Erde vor der Sonne sichtbar wäre, nur etwa 0,5 Prozent. Aus diesem Grunde wurde die Transitmethode lange vernachlässigt. Aber zwei Entwicklungen ließen die Astronomen umdenken. Erstens zeigte sich, dass die entdeckten Riesenplaneten ihre Zentralsterne auf relativ engen Bahnen umlaufen und nicht auf weiten, wie wir es von unserem Sonnensystem kennen. Die engen Bahnen erhöhen die Wahrscheinlichkeit von Transitkonstellationen um das Zehnfache. Zweitens wurden großflächige Messsysteme eingeführt, die mehrere hunderttausend Sterne gleichzeitig beobachten können. Der Hintergedanke dabei: Wenn man lange genug sehr viele Sterne simultan betrachtet, müssen einige von ihnen Durchgänge aufweisen. Auf diese Weise werden Astronomen nicht nur Listen von Planeten zusam- ▶

Extrasolare Planeten – ein Statusbericht

Ferne Welten

Die Anzahl bekannter Planeten, die sonnenähnliche Sterne in unserer kosmischen Nachbarschaft umrunden, erhöht sich fast jeden Monat. Gegenwärtig sind es 49. Doch trotz des immensen Fortschritts lassen sich mit den bisherigen Messverfahren nur relativ große Planeten entdecken, die ihren Mutterstern auf recht engen Bahnen umkreisen. Deswegen ist die vorläufige Liste dieser Trabanten (siehe Tabelle) sicherlich nicht repräsentativ. Gleichwohl zeichnen sich einige überraschende Befunde ab, die uns zwingen, unsere bisherigen Vorstellungen über die Entstehung und die Vielfalt von Planetensystemen zu revidieren.

Alle extrasolaren Planeten wurden indirekt nachgewiesen, und zwar durch die Unwucht, die sie ihrem Zentralstern aufzwingen. Bewegt sich der Stern dabei etwas in Richtung Erde, erscheinen die Spektrallinien zum blauen Ende des optischen Spektrums verschoben, also zu kürzeren Wellenlängen hin. Umgekehrt zeigen die Linien eine geringe Rotverschiebung, wenn sich der Stern etwas von der Erde entfernt. Aus dieser periodischen Doppler-Verschiebung können die Astronomen die Änderung der Radialgeschwindigkeit errechnen und auf die Bahndaten des Planeten schließen. Weil aber von vornherein nicht bekannt ist, in welcher Ebene sich der Planet bewegt, lässt sich für seine Masse nur eine untere Grenze angeben.

Freilich ist die beobachtete Änderung der Radialgeschwindigkeit winzig. Jupiter zum Beispiel, der größte Planet unseres Sonnensystems, verursacht eine Änderung von 12,5 Metern pro Sekunde im Laufe seiner zwölfjährigen Umlaufperiode. Die Linien im Sonnenspektrum (mit einer Wellenlänge von rund 500 Nanometern) schienen einem fernen Beobachter dadurch um 0,000 02 Nanometer verschoben. Die Erde verursacht eine viel kleinere Variation der Radialgeschwindigkeit von nur etwa zehn Zentimetern pro Sekunde – also weit weniger als die Geschwindigkeit eines Fußgängers.

Nach jahrelangen Anstrengungen entdeckten Michel Mayor und Didier Queloz von der Sternwarte Genf 1995 den ersten extrasolaren Planeten mit dieser Methode. Sie wiesen nach, dass ein Objekt von etwa Jupitergröße den Stern 51 Pegasi umkreist, und zwar in dem verblüffend kleinen Abstand von nur 0,05 Astronomischen Einheiten (also dem 0,05-fachen des mittleren Abstandes Sonne–Erde). Kurz darauf fanden Geoffrey W. Marcy und R. Paul

Stern	Mindestmasse (in Jupitermassen)	Bahnexzentrizität	große Halbachse (in Astronomischen Einheiten)
HD 16141	0,22	0,28	0,350
HD 168746	0,24	0,00	0,066
HD 46375	0,25	0,00	0,041
HD 108147	0,34	0,56	0,098
HD 83443	0,35	0,08	0,038
HD 75289	0,42	0,05	0,046
51 Pegasi	0,47	0,00	0,051
BD–10 3166	0,48	0,00	0,046
HD 6434	0,48	0,30	0,15
HD 187123	0,52	0,03	0,042
HD 209458	0,69	0,00	0,045
Ypsilon And b	0,71	0,03	0,059
HD 192263	0,76	0,03	0,150
HD 38529	0,81	0,28	0,129
55 Cancri	0,84	0,05	0,110
Epsilon Eridani	0,86	0,61	3,3
HD 121504	0,89	0,13	0,32
HD 37124	1,04	0,19	0,585
HD 130322	1,08	0,05	0,088
Rho CrB	1,1	0,03	0,23
HD 52265	1,13	0,29	0,49
HD 217107	1,28	0,14	0,07
HD 177830	1,28	0,43	1,00
HD 210277	1,28	0,45	1,097
16 Cygni B	1,5	0,67	1,70
HD 134987	1,58	0,25	0,78
HD 19994	2,0	0,2	1,3
Gliese 876	2,1	0,27	0,21
Ypsilon And c	2,11	0,18	0,830
HD 92788	2,12	0,44	0,99
HD 82943	2,24	0,61	1,16
Iota Hor (HR 810)	2,26	0,16	0,925
47 Ursae Majoris	2,41	0,10	2,10
HD 12661	2,83	0,33	0,789
HD 169830	2,96	0,34	0,823
14 Herculis	3,3	0,35	2,5
HD 1237 (GJ 3021)	3,31	0,51	0,49
HD 195019	3,43	0,05	0,14
Tau Bootis	3,87	0,02	0,046
Gliese 86	4,23	0,05	0,11
Ypsilon And d	4,61	0,41	2,50
HD190228	4,99	0,43	2,31
HD 168443	5,04	0,54	0,277
HD 222582	5,4	0,71	1,35
HD 10697	6,59	0,12	2,0
70 Virginis	6,6	0,40	0,43
HD 89744	7,2	0,70	0,88
HD 114762	10,93	0,34	0,351
HD 162020	13,73	0,28	0,072

QUELLE: CFA-WWW.HARVARD.EDU/PLANETS/CATALOG.HTML

menstellen, sondern auch gleich Statistiken über die Eigenarten ihres Vorkommens anlegen können.

Viele solcher Suchaktionen sind derzeit mit bodengebundenen Teleskopen im Gang, wobei meist nach Riesenplaneten wie jenem Trabanten von HD 209458 gesucht wird. Beim STARE-Projekt (unter der Leitung von Brown) und dem Vulcan-Projekt (geleitet von Borucki, David Koch vom Ames-Forschungszentrum der Nasa sowie von Jon Jenkins vom benachbarten Seti-Institut in Mountain View, Kalifornien) wird in die Milchstraße hinein beobachtet, wo es Sterne in Hülle und Fülle gibt. Andreas Quirrenbach von der Universität von Kalifornien in San Diego und Keith Horne von der St.-Andrews-Universität in Schottland leiten eine Planetenjagd in offenen Sternhaufen, Gruppen aus Hunderten oder Tausenden von Sternen, die sich etwa zur selben Zeit gebildet haben. Da die Astronomen abschätzen können, wie alt ein Sternhaufen ist, kennen sie damit auch gleich das Alter der darin möglicherweise georteten Planeten.

Eine andere Suche wurde unlängst mit dem Hubble-Weltraumteleskop unternommen. Acht Tage lang beobachtete ein Team unter Führung von Ron Gilliland, Astronom am Space Telescope Science Institute in Baltimore (Massachusetts), und Brown den Kugelsternhaufen 47 Tucanae. Die Forscher verfolgten 34 000 Sterne. Rein statistisch betrachtet hätten sie 17 Durchgänge sehen müssen. Tatsächlich gab es keinen einzigen. Noch immer grübeln die Astronomen über dieses Null-Resultat: Vielleicht weist der Sternhaufen zu wenig jener schweren Elemente auf, die sich zu Planeten formen können. Oder die hohe räumliche Dichte der Sterne hat die Planeten in den rund 10 Milliarden Jahren seit Entstehung des Sternhaufens aus ihren Bahnen geworfen. Alle diese Bemühungen verschaffen Erkenntnisse da-





ALFRED T. KAMAJIAN

Viele der bisher entdeckten extrasolaren Planeten umrunden ihre Zentralsterne auf engen und fast kreisförmigen Bahnen wie etwa im System 51 Pegasi. Die zweite Klasse von Planeten weist exzentrische Umlaufbahnen und einen großen Abstand zum Zentralstern auf wie etwa im System 70 Virginis.

Butler – damals an der San Francisco State University – zwei weitere extrasolare Planeten großer Masse. Einer von ihnen umkreist den Stern 70 Virginis auf einer stark elliptischen Bahn – ebenfalls etwas, was man aus unserem Sonnensystem nicht kennt.

Nach Messungen an inzwischen rund 800 Sternen in der Umgebung der Sonne schätzt man, dass etwa jeder zwanzigste sonnenähnliche Stern von einem Riesenplaneten umrundet wird. Manche ähneln dem 51-Pegasi-System, andere dem 70-Virginis-System. Mindestens ein Stern, Ypsilon Andromedae, wird von mehreren Trabanten umrundet.

Weitere Fortschritte in der Messtechnik erlaubten es der Forschungsgruppe von Marcy und Butler, auch zwei Planeten von der Größe des Saturn zu entdecken, der nur etwa ein Drittel der Jupitermasse hat. Kurz nach dieser Entdeckungsmeldung im März 2000 konnte das Genfer Astronomenteam den dritten Planeten dieser Gewichtsklasse nachweisen. Diese Befunde lassen vermuten, dass kleinere Planeten generell recht häufig sind. Andererseits gibt es am oberen Ende der Massenskala – an der sich Braune Zwerge von etwa 10- bis 80facher Jupitermasse befinden – offensichtlich weniger Objekte als erwartet. Es könnte also sein, dass Braune Zwerge und Planeten durch verschiedene Prozesse und mit unterschiedlicher Häufigkeit entstehen.

Die mitunter stark elliptischen Umlaufbahnen geben noch Rätsel auf. Weil sich Planeten in einer Scheibe aus Gas und Staub bilden, die den jungen Zentralstern umgibt, sollten sich die Bahnen infolge von Reibungseffekten immer mehr einem Kreis angenähert haben. Warum ist das bei 70 Virginis und anderen Systemen nicht der Fall? Die Antwort könnten uns die Kometen unseres eigenen Sonnensystems liefern. Einige von ihnen werden offenbar durch nahe Vorübergänge an den äußeren Planeten in elliptische Bahnen geschleudert. Ähnliches könnte auch größeren Himmelskörpern widerfahren. Dann wäre unser Sonnensystem mit seinen nahezu kreisförmigen Umlaufbahnen der Planeten eher die Ausnahme als die Regel. In manchen Sternsystemen wie etwa bei 16 Cygni B könnte auch ein zweiter Zentralstern die Störungen der Planetenbahnen verursachen.

Einigen Wissenschaftlern ist eine Besonderheit bei den bisher bekannten Planetensystemen aufgefallen: Ihre Zentralsterne enthalten Elemente, die schwerer sind als Wasserstoff und Helium, in ungewöhnlich hoher Konzentration. Dies könnte darauf hinweisen, dass ein Mindestgehalt an diesen schweren Elementen erforderlich ist, damit sich in der zirkumstellaren Scheibe überhaupt Planeten bilden können. Vielleicht haben sich die Sterne diese Elemente aber auch nachträglich einverleibt, indem sie einige ihrer neu gebildeten Planeten verschlangen.

Zweifelsohne werden die Astronomen noch weitere Überraschungen erleben, je mehr extrasolare Planeten sie entdecken. Über die Doppler-Verschiebung lassen sich gegenwärtig Änderungen der Relativgeschwindigkeit von etwa drei Metern pro Sekunde nachweisen. Planeten von der Größe des Uranus und des Neptuns, die etwa nur fünf Prozent der Jupitermasse haben, ließen sich damit entdecken. Dynamische Vorgänge auf der Oberfläche der Sterne begrenzen womöglich die Nachweisgenauigkeit auf einen Meter pro Sekunde. Um Planeten von Erdgröße zu entdecken, bedarf es also völlig neuer Beobachtungsverfahren.

Ray Jayawardhana

Der Autor forscht an der Universität von Kalifornien in Berkeley über die Entstehung von Planeten.

rüber, wie Planeten entstehen und wie verbreitet sie sind. Aber die Grenzen in der Empfindlichkeit der Teleskope und die relativ kurzen Messkampagnen führen zu einem selektiven Effekt, der die Entdeckung großer Gasplaneten bevorzugt. Leben, wie wir es kennen, können diese Himmelskörper nicht beherbergen.

Um potenziell bewohnbare Welten zu finden, haben zwei von uns (Doyle und Deeg) einen weiteren Ansatz gewählt. Wir konzentrieren uns auf relativ kleine Sterne, von denen bekannt ist, dass sie die geometrischen Bedingungen zur Beobachtung von Durchgängen erfüllen. Wir beobachten sie dann in einem Zeitraum, der lang genug ist, um mehrere Transite zu erfassen. Selbst wenn das Signal jedes Durchgangs sehr klein ist und sich kaum von den Hintergrundschwankungen abhebt, lassen sich Mehrfachquerungen wegen ihrer Periodizität zu einem aussagekräftigen Signal vereinen.

Was die Größe der Himmelskörper betrifft, muss man sich vergegenwärtigen, wie ein Ort beschaffen sein muss, damit er Leben beherbergen kann. Eine erdähnliche Biochemie erfordert flüssiges Wasser. Dies kann ein Planet nur bieten, wenn seine Umlaufbahn einen bestimmten Abstand von seinem Zentralstern aufweist. Ist der Planet zu nahe, leidet er unter einem sich selbst verstärkenden Treibhauseffekt. Die Atmosphäre eines solchen Planeten sättigt sich dann mit Wasserdampf. Das Sonnenlicht spaltet das Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff, wobei sich letzterer ins Weltall verflüchtigt. Die Folge ist ein knochentrockener, überhitzter Planet ähnlich der Venus. Umgekehrt kühlt ein Planet, der zu weit von seinem Stern entfernt ist, immer weiter aus. Kohlendioxid und andere Treibhausgase kondensieren und legen sich als Schnee über die Oberfläche. Da Schnee mehr Strahlung reflektiert als Gestein, verstärkt sich die Abkühlung ▶

noch. Auf dem Planet herrscht ewiger Frost – ähnlich wie auf dem Mars.

Sterne, die kleiner sind als die Sonne, haben eine geringere Oberflächentemperatur, sodass die lebensfreundliche Zone näher am Stern gelegen ist. Enge Umlaufbahnen erhöhen aber die Wahrscheinlichkeit, den Durchgang eines Planeten zu beobachten. Zudem liefert ein Planet einer gegebenen Größe ein umso deutlicheres Transitsignal, je kleiner der Stern ist. Die Chance, potenziell belebte Planeten zu finden, ist also in der Umgebung kleinerer Sterne am höchsten.

Das zweite Merkmal der Sterne in unserer Auswahl ist, dass sie alle die nötige Stellung aufweisen, um Transitbeobachtungen zu ermöglichen. Wir haben sie aus astronomischen Katalogen von so genannten Bedeckungsveränderlichen herausgepickt – das sind Doppelsterne, deren Umlaufebenen parallel zu unserer Sichtlinie liegen. Astronomen können diese Konstellation aus dem deutlichen und periodischen Wechsel der Helligkeit dieser Systeme ableiten: Die Lichtkurve zeigt immer dann „Dellen“, wenn sich die beiden Sterne bedecken. Im Laufe der Jahre haben Hobby- und Profi-Astronomen Tausende solcher Bedeckungsveränderlicher entdeckt. Abgesehen von ihrer speziellen Ausrichtung relativ zu unserer Sichtlinie sind diese Systeme völlig gewöhnliche Doppelsterne. Sie können stabile Planeten-Umlaufbahnen aufweisen, sofern der Abstand zwischen Planet und Doppelstern wenigstens viermal größer ist als die Distanz der beiden Sterne untereinander. Der Planet zieht um beide Sterne auf ganz gewöhnliche Weise seine Kreise – nur stehen bei ihm zwei Sonnen am Firmament.

Wie Jean Schneider und Michel Chevreton von der Meudon-Sternwarte in Paris erstmals darlegten, sind Bedeckungsveränderliche für den Planetenjäger ein Geschenk der Natur. Falls nämlich die Bahnebene der Planeten im Wesentlichen mit der Bahnebene der Doppelsterne zusammenfällt – wozu es gute Gründe gibt –, sollte die Wahrscheinlichkeit, Durchgänge zu beobachten, 100 Prozent betragen. Zieht ein solcher Planet vor seinen Muttersternen vorbei, sollte er eine verräterische Doppeldelle in der Lichtkurve produzieren, da er erst das Licht des einen und dann das des anderen Sterns reduziert. Die Art der Doppeldelle wird dabei von der momentanen Stellung der Sterne und des Planeten abhängen (Grafik auf Seite 45).

Für unsere Suche nach erdähnlichen Welten hatten wir zunächst CM Draconis ausgewählt. Es ist einer der kleinsten bekannten Bedeckungsveränderlichen. Dieses System ist 54 Lichtjahre von uns entfernt und besteht aus zwei sehr kleinen, kühlen Sternen, die etwa neun Milliarden Jahre alt sind. Planeten innerhalb seiner lebensfreundlichen Zone müssten eine Umlaufzeit von etwa 18 bis 35 Tagen aufweisen. 1994 gründeten wir ein weltweites Netzwerk von Teleskopen der Ein-Meter-Klasse, genannt TEP (*Transit of Extrasolar Planets*), damit wir diesen Doppelstern für mindestens 1000 Stunden beobachten konnten. An dem Messprogramm beteiligten sich Jean Schneider in Paris, Walerij Koshewnikow von der Ural-Universität in Jekaterinburg (Russland), Brian Oetiker von der Universität von Neu-Mexiko in Albuquerque, Eduardo Martín vom Astrophysikalischen Institut der Kanarischen Inseln, J. Ellen Blue von SRI International in Menlo Park (Kalifornien), Remington P. S. Stone vom Lick-Obervatorium nahe San Jose (Kalifornien) und Efthimious Paleologou von der Universität Kreta.

Die Aufgabe bestand nun darin, das gesuchte Transitsignal aus dem störenden „Rauschen“ herauszufiltern, das von dynamischen Vorgängen in der Erdatmosphäre, Instabilitäten der Messgeräte, Veränderungen der Sternaktivität und anderen Faktoren hervorgerufen wird. Unser Suchalgorithmus, den wir gemeinsam mit Jenkins entwickelt haben, vermag sogar Signale zu erkennen, die kleiner sind als die Fluktuationen im Hintergrundrauschen. Wir erstellten 400 Millionen Testprofile, die bei einem Durchgang eines Planeten erzeugt werden könnten, und verglichen sie mit unserem fotometrischen Datenmaterial. Wir erhielten neun Kandidaten, die alle zu Planeten von etwa zweieinhalbfachem Erddurchmesser passen würden. Die spannende Frage war nun, ob diese Signale regelmäßig wiederkehren. Bis zur Drucklegung dieses Artikels blieben noch zwei Kandidaten übrig: einer mit einer 21-tägigen und einer mit einer 26-tägigen Umlaufbahn. Mittlerweile haben wir unsere Suche auf einige hundert weitere Bedeckungsveränderliche ausgeweitet.

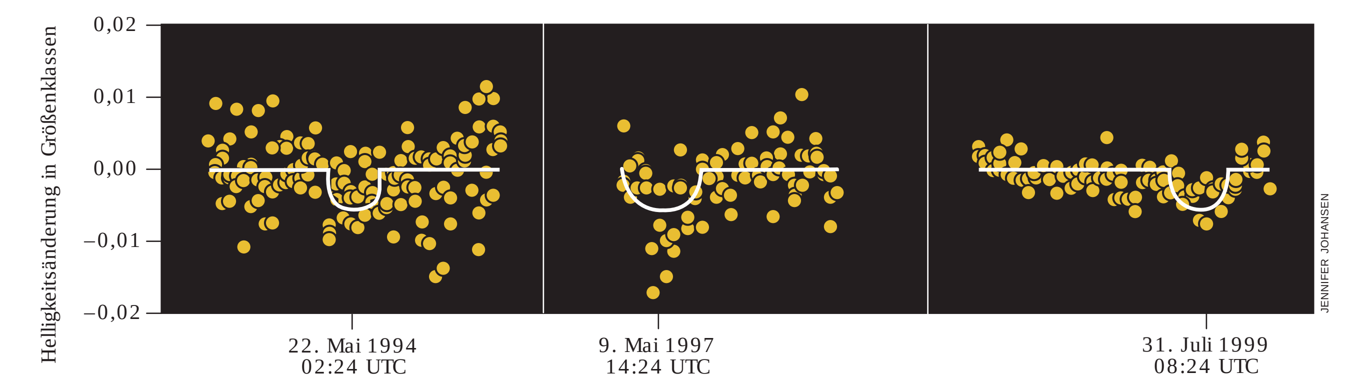
Möglicherweise ließe sich durch genaues Registrieren der Durchgangszeiten auch enthüllen, ob die Planeten ihrerseits über Trabanten verfügen. Wenn beispielsweise außerirdische Astronomen

Literaturhinweise

A Search for Jovian-Mass Planets around CM Draconis using Eclipse Minima Timing. Von Hans-Jörg Deeg et al. in: Astronomy and Astrophysics, Bd. 358, S. L5, 20. Juni 2000.

Observational Limits on Terrestrial-Sized Inner Planets around the CM Draconis System Using the Photometric Transit Method with a Matched-Filter Algorithm. Von Laurance R. Doyle et al. in: Astrophysical Journal, Bd. 535, S. 338, 20. Mai 2000.

Weblinks unter ***www.spektrum.de/aktuellesheft.html***

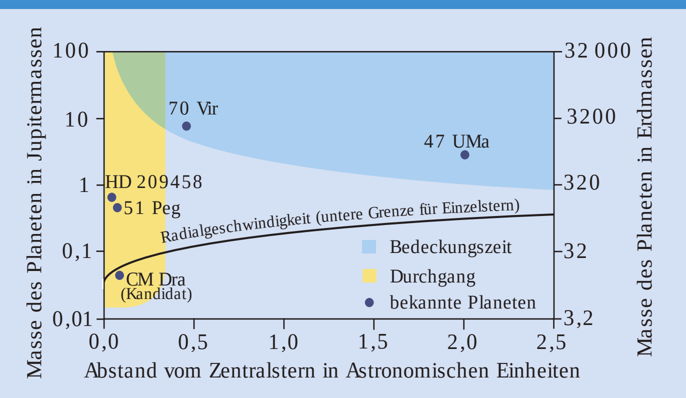


Nichts als ein Hintergrundrauschen? Oder versteckt sich doch das Signal eines Planeten in diesen Helligkeitsmessungen des Doppelsterns CM Draconis (Messpunkte)? Um Zufallsschwankungen (verursacht durch die Erdatmosphäre) ausschließen zu können, suchten die Autoren nach sich wiederholenden Mustern. Die durchgezogenen Linien stellen jeweils den Durchgang eines Planeten mit zweieinhalbfachem Erddurchmesser auf einem 23 Tage währenden Umlauf dar.

unsere Sonne beobachten würden, könnten sie alle 365,24 Tage eine geringe Abnahme ihrer Helligkeit bemerken und so auf die Anwesenheit der Erde schließen. Im Laufe der Jahre würden sich die Durchgänge allerdings um bis zu zwei Minuten früher oder später ereignen, was auf das Vorhandensein unseres Mondes hinweisen würde. Andere auf den Orbit einwirkende Faktoren können nur Störungen von wenigen Sekunden hervorrufen. Wäre die Fotometrie der Außerirdischen besonders präzise, könnten sie auch eine winzige zusätzliche Abschattung feststellen, die der Durchgang des Mondes vor der Sonne selber verursacht.

Durchgänge sind indes nicht der einzige Weg, auf dem ein Planet einem Fotometer seine Anwesenheit verraten kann. Ein Bedeckungsveränderlicher stellt eine Art präzise Uhr dar: Die beiden Sternkomponenten sollten sich in regelmäßigen Intervallen bedecken. Wenn Abweichungen von diesem Rhythmus auftreten, kann dies bedeuten, dass ein weiterer Himmelskörper durch seine Schwerkraft auf das System einwirkt.

Wie man Planeten findet



Dargestellt ist die Nachweisempfindlichkeit für Planeten einer bestimmten Masse und eines bestimmten Abstandes zum Zentralstern. Selbst an ihren theoretischen Grenzen versagt die Radialgeschwindigkeitsmethode (siehe Text, schwarze Kurve) für Planeten mit weniger als 0,3 Jupitermassen, sofern sie nicht sehr nah am Zentralstern sind. Die Transitmethode (siehe Text) kann erdgroße Trabanten identifizieren. Die gegenwärtige Messgenauigkeit schränkt den zugänglichen Bereich auf kleine Abstände des Planeten von seinem Zentralstern ein (gelb), während Beobachtungen vom Weltraum aus das komplette Diagramm abdecken würden. Für Doppelsterne kann die Radialgeschwindigkeitsmethode nicht angewendet werden. Die Methode der Zeitmessung ihrer gegenseitigen Bedeckungen (blau) ist umso empfindlicher, je weiter der Planet entfernt ist.

„So viele Sonnen, so viele Erden“

Angenommen, ein Planet von der Masse Jupiters zöge den Doppelstern von uns weg, dann würde die Bedeckung einige Sekunden später auftreten, weil das Licht der beiden Sterne einen längeren Weg zur Erde zurücklegen müsste. Je größer die Masse und je weiter entfernt der Planet, umso größer wäre die Abweichung. Ein Riesenplanet könnte also auch entdeckt werden, ohne dass es überhaupt zu einem Durchgang vor dem Doppelgestirn kommt. Anhand der Daten des TEP-Projekts haben wir bereits Grenzen für das Vorkommen von großen Planeten in CM Draconis ermittelt: Körper von mehr als drei Jupiter-Massen können in diesem System ausgeschlossen werden. Es gibt jedoch Hinweise auf einen Planeten mit 1,5 bis 3 Jupitermassen und einer Umlaufperiode von 750 bis 1050 Tagen.

Hohe fotometrische Präzision und jahrelange Beobachtungen eröffnen noch eine weitere Möglichkeit: das von einem Planeten reflektierte Licht zu entdecken. Planeten, die ihren Sternen hinreichend nahe sind, reflektieren nämlich einen Teil des Sternenlichtes in Richtung Erde. Ähnlich wie der Mond einmal pro Monat einen kompletten Phasenzyklus durchläuft, rufen sie eine zyklische Helligkeitsveränderung hervor, die sich von anderen Schwankungen der Sternenhelligkeit unterscheiden lassen müsste. Dieses Verfahren dürfte Planeten enttarnen, die eine Umlaufzeit von einer Woche oder weniger haben. Es könnte sogar weitere Eigenschaften des Planeten aufdecken, denn raue Oberflächen sollten größere Helligkeitsveränderungen hervorrufen als glatte. Auch im Spektrum des Sterns könnte von dem Planeten reflektiertes Licht zu erkennen sein. So berichteten Andrew Collier Cameron von der St.-Andrews-Universität und seine Kollegen 1999, dass sie die Reflexion eines gigantischen Planeten um den Stern Tau Bootis erfasst hätten, doch ist diese Entdeckung noch umstritten.

Da die größten Fehlerquellen beim Messen der Sternhelligkeit auf die Erdatmosphäre zurückgehen, würden Beobachtungen von einem Weltraumobservatorium aus die Genauigkeit deutlich erhöhen. Mehrere solcher Missionen werden gegenwärtig vorbereitet. Das von Frankreich geplante Teleskop COROT soll 2004 gestartet werden und empfindlich genug sein, um Planeten von doppelter Erdgröße zu entdecken. Das „Eddington“-Projekt der Europäischen Raumfahrtorganisation Esa, an dem einer von uns (Deeg) mitarbeitet, wird tatsächlich auch erdgroße Planeten ausfindig machen können. Das ambitionierteste Projekt ist jedoch der vorgeschlagene Nasa-Satellit „Kepler“: Er soll 170 000 Sterne im Sternbild Schwan beobachten. Man erwartet, die Durchgänge von über 600 erdgroßen Planeten zu registrieren sowie die Reflexionen von rund 1700 Riesenplaneten. Künftige Interferometer im Weltraum könnten schließlich das gleißende Licht der Sterne ausblenden und richtige Bilder der Planeten liefern (siehe „Die Suche nach Leben auf fernen Planeten“, Spektrum der Wissenschaft 6/1996, S. 90). Während der Durchgänge werden die Planeten von ihren Sonnen rückseitig bestrahlt, was es ermöglichen sollte, spektroskopisch die chemische Zusammensetzung ihrer Atmosphäre zu untersuchen. So würden sich möglicherweise Hinweise auf biologische Vorgänge finden lassen.

Alle unsere Kollegen, die sich an der Suche nach erdähnlichen Planeten beteiligen, fühlen das Privileg, in einer Zeit der Neuentdeckungen zu leben. Wie der Renaissance-Astronom Christiaan Huygens schrieb: „Welch wundervolles und verblüffendes System weist die herrliche Weite des Weltalls auf! So viele Sonnen, so viele Erden!“ Hatte Huygens recht? Gibt es da draußen Planeten wie den unsrigen? Sind sie bewohnt? Gegen Ende dieses Jahrzehnts sollten wir es wissen. ■

Laurance R. Doyle *arbeitet am Seti-Institut in Mountain View (Kalifornien).* ***Hans-Jörg Deeg*** *forscht am Astrophysikalischen Institut von Andalusien in Granada (Spanien).* ***Timothy M. Brown*** *ist am Nationalen Zentrum für Atmosphärenforschung der USA in Boulder (Colorado) tätig. Die drei Astronomen setzen seit Anfang der neunziger Jahre fotometrische Methoden ein, um extrasolare Planeten aufzuspüren.*

Operieren am schlagenden Herz

Bypass-Operationen am Herz – riskant, aber oft lebensrettend – werden schonender. Hightech-Robotorsysteme für die Herz-Chirurgie brauchen nur noch knopflochgroße Schnitte als Zugang, und dank mechanischer Herzstabilisatoren kann das Organ während des Eingriffs sogar weiterschlagen.

VON CORNELIUS BORST

Die kleinste Anstrengung – und schon fühlt sich Maria W., als sei ihr ein Elefant auf den Brustkorb gestiegen. Die Schmerzattacken im Brustbereich machen für die ältere Dame inzwischen fast jede körperliche Aktivität unmöglich. Aufstehen und Anziehen dauern mindestens eine Stunde.

Verursacht werden diese Schmerzen von verengten Herzkranzgefäßen, die den Herzmuskel mit sauerstoffreichem Blut versorgen sollen. Eine Bypass-Operation, die Ersatzgefäße als Umleitung – englisch *bypass* – um die Engpässe legt, wäre bitter nötig. Doch Lunge und Nieren der Rentnerin sind geschädigt. Zudem erlitt sie erst kürzlich einen Schlaganfall. Zwar würde ihre Versicherung die Kosten für den Eingriff übernehmen. Der zuständige Herzchirurg hält aber einen Eingriff für zu gefahrvoll und lehnt eine Operation ab.

Szenenwechsel: Bodo B., Betreiber einer eigenen kleinen Software-Firma, bräuchte einen dreifachen Bypass. Er fürchtet aber Komplikationen, die unter Umständen die Hirnfunktionen beeinträchtigen. Dieses Risiko möchte der Selbstständige keinesfalls eingehen, da seine Programmier-Fähigkeiten schließlich seine Existenzgrundlage darstellen.

Konstellationen wie diese (Namen reaktionell geändert) illustrieren beispielhaft den Bedarf an schonenderen, möglichst auch kostengünstigeren Operationsverfahren.

Weltweit unterziehen sich derzeit grob 800 000 Menschen einer Bypass-Operation an den Herzkranzgefäßen, eine zugleich teure Angelegenheit. Wer nur unzureichend versichert ist, kann sich oft den Eingriff samt Krankenhausaufenthalt nicht leisten. In den USA etwa kosten Operation und Krankenhausaufenthalt zirka 45 000 Dollar, in Europa immerhin noch die Hälfte. In Deutschland werden jährlich rund 100 000 Menschen am Herz operiert, drei Viertel davon wegen koronarer Herzerkrankungen.

Beginnt eine Revolution?

Eine herkömmliche Bypass-Operation ist für die Patienten keine leichte Sache. Den verengten Bereich eines Herzkranzgefäßes überbrückt der Chirurg gewöhnlich mit einer gesunden Vene aus dem Bein oder mit einer Brustwandarterie (Bild Seite 52 oben). Um an das Herz selbst heranzukommen, muss er nach klassischer Methode vorher jedoch den Brustkorb öffnen, sprich das Brustbein mit einer Säge längs durchtrennen und die Ränder weit auseinander spreizen. Da kein Chirurg eine Gefäßbrücke präzise genug an einem pulsierenden Herz vernähen kann, wird es vorübergehend – gewöhnlich für etwa eine Stunde – stillgelegt. Dies geht nicht ohne eine Herz-Lungen-Maschine, die das Blut künstlich durch den Körper pumpt und die Gewebe mit Sauerstoff versorgt – bis die Ärzte das Herz erneut starten.

Mit dieser ausgeklügelten Apparatur begann vor rund vierzig Jahren die Ära der modernen Herzchirurgie. Bis heute aber blieb ihr Gebrauch mit ernsten Komplikationen behaftet, vor allem bei älteren oder geschwächten Patienten. Die Herz-Lungen-Maschine ist hauptverantwortlich für den relativ langen nachoperativen Krankenhausaufenthalt (im Mittel zwischen sechs und acht Tagen) und die beachtliche Rekonvaleszenz-Zeit von oft zwei bis drei Monaten. Zudem erholen sich viele Patienten nur langsam vom Öffnen des Brustkorbs; sie sind dann auch anfälliger für bestimmte Infektionen wie eine Lungenentzündung.

Mit zwei neuen chirurgischen Techniken, die Mitte der 90er Jahre entwickelt wurden, bahnt sich nun vielleicht eine Revolution in der koronaren Bypass-Chirurgie an. Einige Wissenschaftler, darunter auch ich, begannen damals Möglichkeiten zu prüfen, wie sich doch am schlagenden Herz operieren und so die Herz-Lungen-Maschine überflüssig machen ließe. Andere Teams widmeten sich Methoden für endoskopische Eingriffe am Herz – eine Operationsart, die in Perfektion nur einige knopflochgroße Schnitte in der Brustwand erfordert. Nach meinen Einschätzungen wird dank dieser Entwicklungen in den nächsten zehn Jahren die koronare Bypass-Chirurgie um vieles risikoärmer und teils kostengünstiger werden.

Steckbrief

Das Hauptproblem bei Bypass-Operationen am Herz
Bei der herkömmlichen Methode muss der Brustkorb meist weit geöffnet, das Herz stillgelegt und der Patient an eine Herz-Lungen-Maschine angeschlossen werden.

Zwei Lösungsansätze
➤ Statt den Brustkorb weit zu öffen, steuert der Operateur ein endoskopisches Chirurgie-Robotersystem, dessen „Hände“ durch kleine Öffnungen passen. Der große, belastende Brustschnitt entfällt. Einige Herzzentren erproben inzwischen diese Hightech-Geräte.
➤ Statt das Herz komplett stillzulegen, hält ein einfaches mechanisches Gerät den kleinen Bereich fest, an dem der Chirurg die Gefäßbrücke vernäht. Der Einsatz der Herz-Lungen-Maschine entfällt, und die Patienten erleiden weniger Komplikationen.



Einige medizinische Zentren erproben eine robotergestützte Schlüsselloch-Chirurgie am schlagenden Herz als eine risikoärmere Alternative zum konventionellen Verfahren. Bei einer herkömmlichen Bypass-Operation (links) wird meist der Brustkorb aufgesägt, das Herz stillgelegt und der Patient vorübergehend an eine Herz-Lungen-Maschine angeschlossen. Das Foto rechts zeigt die Instrumente an den gelenkigen Armen des Robotersystems „da Vinci" beim Einsatz. Sterile Plastikfolie umhüllt die Außenteile (großes Foto).

OWEN FRANKEN, CORBIS

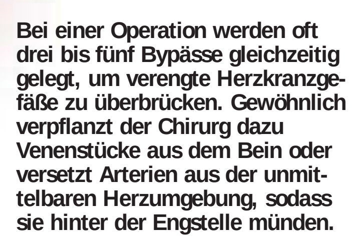
1999 © HUBERT RAQUET / EURELIOS

1999 © HUBERT RAQUET / EURELIOS

Die typischen Brustschmerzen vor der Operation rühren von einer Arteriosklerose der größeren Herzkranzgefäße her – besser als Arterienverkalkung bekannt. In den Arterienwänden lagern sich mit der Zeit häufig Substanzen wie Cholesterin ab. Die entstehenden Verdickungen behindern den Blutfluss. Das Übel kann schon früh – zunächst unbemerkt – beginnen und dann langsam fortschreiten. Bei jedem fünften Mann im Alter zwischen 30 und 35 Jahren ist in den Vereinigten Staaten bereits die wichtigste Koronararterie verengt, und zwar um mindestens 40 Prozent. Später, im mittleren Alter, verspüren die Betroffenen bei körperlicher Anstrengung vielleicht einen leichten Schmerz in der Brust, weil der Blutstrom durch die Herzkranzgefäße nicht mehr der starken Belastung entsprechend gesteigert werden kann.

Durch die arteriosklerotisch bedingten Brustschmerzen sind schließlich nicht wenige Menschen zu fast keiner körperlichen Aktivität mehr im Stande: Weltweit leiden Millionen an dieser katastrophalen Erkrankung. Gefördert wird sie durch mehrere Faktoren. Neben einer genetischen Veranlagung spielen falsche Ernährung und ungesunder Lebensstil eine wichtige Rolle. So dringlich Verbesserungen in der Therapie der koronaren Herzkrankheit auch sind – der Schwerpunkt muss deshalb auf der Vorbeugung liegen. Und dazu gilt es, die Menschen zu motivieren. Wer sich angemessen ernährt, Sport treibt und nicht raucht, tut viel für sich – und das nicht nur im Hinblick auf Herz-Kreislauf-Erkrankungen.

Wenn infolge einer Arteriosklerose Brustschmerzen auftreten, kann der Arzt zunächst unterschiedliche Medikamente verschreiben. Manche Patienten entscheiden sich auch für eine so genannte Angioplastie. Ein Kardiologe schiebt dabei über einen Katheder einen kleinen wurstförmigen Ballon in die verschlossene Arterie und bläst ihn auf, um die Engstelle zu weiten. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, ein kleine metallene Gefäßstütze in der Arterie zu verankern; dieser so genannte Stent soll sie innen offen halten. Wenn jedoch aller Voraussicht nach ein baldiger Wiederverschluss des Blutgefäßes droht, dann stellt am ehesten ein Bypass eine ausreichende Blutversorgung zum Herz sicher. Bei einer solchen Operation transplantiert der Chirurg meist drei bis fünf Gefäßbrücken auf die Herzarterien; um eine einzige „Umleitung“ mit einem Dutzend oder mehr sorgfältig gesetzter Stiche auf eine Kranzarterie zu nähen, braucht er bereits etwa zwanzig Minuten.



Bei einer Operation werden oft drei bis fünf Bypässe gleichzeitig gelegt, um verengte Herzkranzgefäße zu überbrücken. Gewöhnlich verpflanzt der Chirurg dazu Venenstücke aus dem Bein oder versetzt Arterien aus der unmittelbaren Herzumgebung, sodass sie hinter der Engstelle münden.

Komplikationen während einer Herzoperation gehen oftmals auf den Einsatz der Herz-Lungen-Maschine zurück. Beim Anschluss an den Patienten werden Schläuche in die großen zu- und abführenden Gefäße des Herzes geschoben. Anschließend klemmt der Chirurg die Hauptschlagader ab, die von der linken Herzkammer abgeht, und leitet eine spezielle Lösung in die Kranzgefäße, die das Organ erschlaffen lässt. Bei diesen Manipulationen lösen sich unter Umständen Teile so genannter arteriosklerotischer Plaques von der Aortenwand. Gelangen sie ins Gehirn, droht ein Schlaganfall. Die Herz-Lungen-Maschine führt zudem zu allgemeinen Entzündungsreaktionen, die das körpereigene Abwehrsystem und die Blutgerinnung beeinträchtigen. Fieber, Organschäden und Blutverluste sind eine häufige Folge. Kurz nach der Operation kann die Atmung beeinträchtigt sein, sodass die Patienten eine Zeit lang auf künstliche Beatmung angewiesen sind. Schließlich leidet das Herz selbst oft unter der Prozedur, was sich zeigt, wenn es erneut zu schlagen beginnt: Unter Umständen ist der Blutdruck zu niedrig, der Körper wird schlecht durchblutet, und die Nieren produzieren nicht ausreichend Harn. In seltenen Fällen lässt sich der Operierte nicht von der Herz-Lungen-Maschine abnabeln, ohne den Blutdruck weiterhin mit einer mechanischen Pumpe zu stützen.



Die Herz-Lungen-Maschine ist bei herkömmlichen Bypass-Operationen nötig, weil das Herz stillgelegt werden muss. Ihr Einsatz erhöht das Risiko für Schlaganfälle, Fieber, Infektionen oder Blutverluste und kann relativ lange Beatmungszeiten noch nach der Operation erfordern.

Anstoß vom Militär

Verschiedene Studien erlauben es, die Risiken zu quantifizieren, zum Beispiel jenes, kurz nach einer Bypass-Operation zu sterben. In den Vereinigten Staaten etwa steigt es von 1,1 Prozent für die Altersgruppe zwischen 20 und 50 Jahren auf 7,2 Prozent für Senioren zwischen 81 und 90. Während des Eingriffs kommt es bei jedem dritten Patienten zu mindestens einer Komplikation. Dass Bypass-Operationen für Personen über 65 nicht ungefährlich sind, zeigt eine 1997 veröffentlichte Auswertung von mehr als über 100 000 bei US-Krankenversicherungen registrierten Fällen: Vier Prozent der Patienten verstarben im Krankenhaus; weitere vier Prozent wurden in ein Pflegeheim überführt; und zehn Prozent konnten das Krankenhaus erst nach zwei Wochen oder mehr wieder verlassen. Nicht selten verhindern Gedächtnisverlust, Konzentrationsschwierigkeiten, Depressionen oder körperliche Schwäche über mindestens zwei bis drei Monate hinweg eine rasche Rückkehr zu gewohnten Tätigkeiten.

Um eine bessere Behandlung der koronaren Herzkrankheit geht es mir nun schon seit 15 Jahren bei meinen Forschun-

gen. Ein konkretes Ergebnis hiervon: eine mechanische Vorrichtung, die nur den Bereich mit den verengten Arterien ruhig stellt und nicht gleich das ganze Herz, was eine Herz-Lungen-Maschine entbehrlich macht.

Den Anstoß zu der Idee erhielt ich auf Umwegen. Im März 1993 war ich auf einem Workshop für Ärzte und Forscher in Palm Coast (Florida), bei dem es um Laser-Anwendungen in Biologie und Medizin ging. Mich faszinierte ein Vortrag von Richard Satava, damals Arzt bei der US-Armee. Es ging um eine Initiative des Militärs, spezielle Roboter zu entwickeln, mit deren Hilfe Ärzte einmal ferngesteuert Notoperationen auf dem Schlachtfeld vornehmen könnten. Satava zeigte uns bereits das Foto eines Prototyps. Sollte es dann nicht auch möglich sein, fragte ich mich, in einem Operationssaal mit Roboter-Hilfe an einem schlagenden Herz im geschlossenen Brustkorb zu operieren? Während ich noch diesen Ansatz weiterverfolgte, begann ich zu überlegen, wie man Eingriffe am schlagenden Herz ohne derart teure und komplexe Geräte durchführen könnte.

Damals existierte bereits ein in Südamerika entwickeltes Verfahren für Operationen am schlagenden Herz. Entwickelt hatten es in den achtziger Jahren Frederico J. Benetti am Zentrum für Kardiovaskuläre Chirurgie in Buenos Aires und, unabhängig davon, Enio Buffolo an der Medizinischen Fakultät Paulista der Bundesuniversität von São Paulo. Beide hatten bereits Erfahrungen mit Patienten gesammelt. Zusammen mit dem Herzchirurgen Erik W. L. Jansen, einem meiner Kollegen am Herz-Lungen-Institut in Utrecht, wollte ich im Frühjahr 1994 das Verfahren zunächst an Schweinen erproben.

Das Herz in der Klemme

Die beiden südamerikanischen Ärzte hatten um den interessierenden Bereich der Herzoberfläche mehrere stabilisierende Nähte angelegt; zusätzlich drückte ein Assistent mit ruhiger Hand eine große chirurgische Klemme auf das Gebiet, in dessen Zentrum der Bypass angenäht werden sollte. Nur wenige Quadratzentimeter des schlagenden Herzes an der Bewegung zu hindern beeinträchtigt die Pumpleistung insgesamt kaum. Jedoch fiel es den meisten Chirurgen schwer, diese elegante, kostengünstige Methode zu meistern, und so fanden Benetti und Buffolo anfangs wenige Nachahmer.

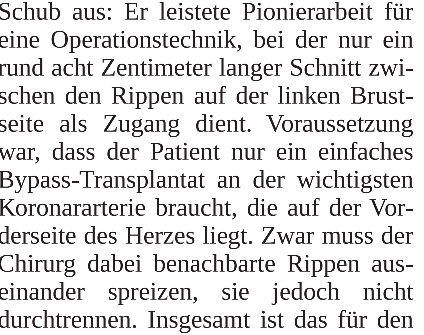
Mit diesen Schwierigkeiten hatten auch wir zu kämpfen. Als ich einmal bei einer experimentellen Operation an einem Schwein die Klemme ruhig aufgepresst halten sollte, gelang es uns nicht, den interessierenden Bereich vollständig stillzulegen. Der Misserfolg aber beflügelte meine Gedanken: Die zu „weichen“ Gewebsnähte und die menschliche Hand könnte man ersetzen durch einen starren mechanischen Apparat, der das Herz stabilisieren würde. Unser Techniker Rik Mansvelt Beck fertigte Prototypen eines Herz-Stabilisators an. Wochen voller Überschwang folgten, in denen Jansen damit ohne weiteres einen perfekten Bypass nach dem anderen an schlagenden Schweineherzen anbrachte.

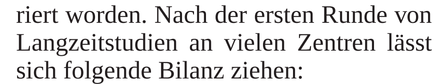
Kurz danach stieß mein Institutskollege Paul Gründeman zu unserem Team, und wir erfanden den Octopus-Herz-Stabilisator: ein Instrument, das jeden gewünschten Fleck auf einem schlagenden Herz bewegungsfrei zu halten vermag (siehe Bild oben). Der Name spielt auf die kleinen Saugglocken an, die das Instrument am Herz befestigen, und auf eines unserer Versuchsschweine namens „Octopussy“ (wir tauften alle unsere Tiere nach Figuren aus James-Bond-Filmen). Die erste Bypass-Operation mit dem Octopus-System an einem Patienten unternahmen wir im September 1995. Bis Mitte 2000 folgten 50000 weitere Operationen mit „Octopus“ weltweit – mehr als 400 davon hier in Utrecht; in dieser ausgewählten Gruppe starb kein einziger Patient innerhalb von dreißig Tagen nach dem Eingriff.

Wie so oft in der Geschichte medizinischer Entdeckungen und Erfindungen kam es auch in unserem Fall zu Parallelentwicklungen: Andere Forscher entwarfen unabhängig von unserer Gruppe etwa zur gleichen Zeit mechanische Stabilisatoren. Die meisten dieser Geräte nutzen keine Saugkräfte zum Haften, sondern Druck und Reibungskräfte; sie ähneln einer großen chirurgischen Klemme, die sich aufs Herz presst. Inzwischen stehen den Operateuren mehr als ein Dutzend unterschiedliche Typen mechanischer Herz-Stabilisatoren zur Verfügung.

Im Jahr 1994 wurden weltweit erst 0,1 Prozent der koronarchirurgischen Eingriffe ohne Herz-Lungen-Maschine durchgeführt. 1999 lag der Anteil bei etwa zehn Prozent; für 2000 erwarten wir einen von rund 15 und für das Jahr 2005 dann von mehr als 50 Prozent. Wo hochtechnische Einrichtungen mit Herz-Lungen-Maschinen fehlen, wie etwa in vielen Entwicklungsländern, wird das Verfahren zur Operation am schlagenden Herz erstmals Patienten die Möglichkeit eröffnen, einen Herz-Bypass zu erhalten. In Industrieländern muss allerdings während einer Operation am schlagenden Herz eine solche Maschine für Notfälle bereit stehen. ▶

Mechanische Herz-Stabilisatoren – wie hier der vom Autor und seinen Kollegen entwickelte „Octopus“ – machen inzwischen in etlichen Fällen den Einsatz einer Herz-Lungen-Maschine entbehrlich. Sie halten den interessierenden Bereich auf einem schlagenden Herz starr fixiert, sodass der Chirurg dort einen Bypass präzise genug annähen kann. „Octopus“ verankert sich durch Ansaugen an der Herzoberfläche. Über den blauen Drehknopf wird das Gerät an dem Metallrahmen fixiert, der den Brustkorb offen hält (links). Das Herz schlägt bei der ganzen Prozedur fast normal weiter.





Von Benetti, dem argentinischen Herzchirurg, ging aber noch ein weiterer Schub aus: Er leistete Pionierarbeit für eine Operationstechnik, bei der nur ein rund acht Zentimeter langer Schnitt zwischen den Rippen auf der linken Brustseite als Zugang dient. Voraussetzung war, dass der Patient nur ein einfaches Bypass-Transplantat an der wichtigsten Koronararterie braucht, die auf der Vorderseite des Herzes liegt. Zwar muss der Chirurg dabei benachbarte Rippen auseinander spreizen, sie jedoch nicht durchtrennen. Insgesamt ist das für den Patienten deutlich weniger belastend, als ihm den ganzen Brustkorb aufzusägen.

Welche Vorteile dieses Vorgehen für Operationen am schlagenden Herz bietet, erkannten einige andere Chirurgen sehr schnell, darunter Valavanur Subramanian am Lenox-Hill-Hospital in New York City und Michael Mack am texanischen Columbia-Hospital in Dallas. Bei einem Workshop in Rom im November 1994 präsentierte Subramanian eine vielbeachtetes Video seiner Arbeit. Daraufhin verbreitete sich die „Operationstechnik mit begrenztem Hautschnitt am schlagenden Herz“ – englisch: *limited incision, beating heart surgery* – rasch über ganz Europa. Anschließend veröffentlichte Antonio M. Calafiore vom Krankenhaus San Camillo de Lellis in Chieti (Italien) solch gute Ergebnisse bei zahlreichen Patienten, dass Eingriffe am schlagenden Herz nun weltweit die Aufmerksamkeit auf sich zogen. Zu Beginn des ersten Workshops für minimal-invasive Koronar-Chirurgie in Utrecht im September 1995 waren schon einige tausend Patienten auf diese Weise behandelt worden.

Preiswerte Schonung

Die neuen Methoden können allerdings die konventionelle Bypass-Chirurgie gegenwärtig nicht völlig ersetzen. Für viele Patienten bleibt sie die bessere Wahl. Wir entwickeln unseren Ansatz jedoch kontinuierlich fort, erweitern so sein Anwendungsspektrum. Beispielsweise gestaltet sich eine Operation am schlagenden Herz oft schwierig, wenn der Bypass an der Rückwand des Herzes gelegt werden soll, ein häufiger Fall. Dazu muss der Chirurg das Organ teilweise aus der Brusthöhle herausheben, was es verformt und so beim Pumpen behindert. Das Herz fördert dann weniger Blut, und im typischen Fall sackt der Blutdruck bedrohlich ab.

Mit einigen einfachen Maßnahmen lässt sich dieser Gefahr begegnen, wie Forschungsarbeiten der letzten Jahre gezeigt haben. In meinem Labor wies Gründeman nach, dass ein Kippen des OP-Tisches um 15 bis 20 Grad, was den Kopf unter Brustniveau bringt, einen dramatischen Blutdruckabfall beim Anheben des Herzes verhindern hilft. Im Real Hospital Português in Recife (Brasilien) kam Ricardo Lima auf eine andere elegante Methode, die Rückseite des Herzes zu exponieren, ohne dabei den Blutdruck zu sehr zu beeinträchtigen. Die meisten Chirurgen bedienen sich mittlerweile seiner Strategie: Man hebt das Herz am Herzbeutel etwas aus der Brusthöhle heraus.

Mitte 2000 waren bereits fast 200 000 Patienten mit Hilfe irgendeines mechanischen Stabilisators am schlagenden Herz operiert worden. Nach der ersten Runde von Langzeitstudien an vielen Zentren lässt sich folgende Bilanz ziehen:

- ➤ Diese Patienten erlitten weniger Komplikationen während der Operation,
- ➤ benötigten weniger Bluttransfusionen,
- ➤ kamen schneller ohne künstliche Beatmung oder Intensivpflege aus,
- ➤ konnten das Krankenhaus früher verlassen und schneller ihre gewohnten Aktivitäten wieder aufnehmen als Patienten, die sich einer herkömmlichen Herzoperation unterzogen hatten.

Darüber hinaus verringern sich nach vorläufigen Berichten die Gesamtkosten für Einfach-Bypass-Eingriffe um etwa ein Drittel. So gut wie all diese Studien basieren allerdings auf sorgfältig ausgewählten Patientengruppen. Daher sind die Ergebnisse möglicherweise nicht repräsentativ für die Patientenkonstellation im „Alltagsbetrieb“. Endgültige Ergebnisse zu Risiken und Nutzen von Operationen am schlagenden Herz erwarten meine Kollegen und ich nach Abschluss randomisierter klinischer Studien, im Falle von „Octopus“ in den Niederlanden voraussichtlich Ende 2001.

Schlüsselloch zum Herz

Ein wesentlicher Vorteil von Operationen am schlagenden Herz ist, dass normalerweise keine Herz-Lungen-Maschine eingesetzt werden muss, es sei denn im Notfall. Als wirkliches Problem bleibt das oft nötige weite Öffnen der Brust-höhle, wie schon bei herkömmlichen Bypass-Operationen. Das könnte sich jedoch gleichfalls ändern. Bauchchirurgen beispielsweise sind dank so genannter endoskopischer Techniken in der Lage, durch kleinste Hautschnitte in Knopflochgröße unter anderem eine Gallenblase zu entfernen. Durch die eine Hautöffnung schieben sie ein Endoskop – im Prinzip ein starres Rohr mit einer Miniatur-Videokamera –, durch die anderen die benötigten chirurgischen Instrumente. Die Videoübertragung aus dem Endoskop leitet den Chirurgen bei seinen Bewegungen. Warum sollte man also nicht auch am Herz mit minimal-invasiven Techniken operieren können, für die nur zentimetergroße Hautschnitte zwischen den Rippen nötig wären?

Forscher an der Stanford-Universität in Kalifornien machten 1991 einen ersten großen Schritt in diese Richtung. Ihre Initiative führte zur Gründung der Firma Heartport, heute in Redwood, gleichfalls Kalifornien, angesiedelt. Spezialisiert hat sich das Unternehmen auf endoskopische Herzchirurgie im geschlossenen Brustkorb, aber bei stillste-



PETER MENZEL



INTUITIVE SURGICAL

Das Arbeitsfeld des Operateurs während einer Bypass-Operation mit einem Robotersystem für minimal-invasive Chirurgie (unten); darüber eine Auswahl der verwendeten winzigen Instrumente. Kameraaugen, die durch kleine Hautschnitte zwischen den Rippen eingeführt werden, verschaffen Einblick in den Brustkorb. Der Operateur dirigiert über eine Computerkonsole die chirurgischen Instrumente. Händezittern filtert der Rechner.

hendem Organ unter Einsatz der Herz-Lungen-Maschine.

Für den Anschluss an die Maschine und zum Stoppen des Herzschlags müssen verschiedene Schläuche und Katheter von der Leiste her bis zum Herz vorgeschoben werden. Nicht alle Patienten vertrugen das anfangs problemlos. Dazu stellte sich heraus, dass die Operateure ihr ganzes Geschick aufbieten mussten, um den Bypass wirklich anzunähen. Die herkömmlichen endoskopischen Instrumente stießen an ihre Grenzen; der Platzmangel im geschlossenen Brustkorb macht ohnehin jedes Manöver schwierig, sodass die ersten Versuche, einen endoskopischen Eingriff am Herz vorzunehmen, schon nach dem dritten Patienten aufgegeben wurden. Erst bei späteren Versuchen mit größeren Hautschnitten – zwischen sechs und neun Zentimetern – konnten die Chirurgen das Transplantat verlässlich auf ein Herzkranzgefäß nähen. Bis Mitte 2000 waren dann über 6000 Patienten auf diese Weise operiert worden.

Der Idealfall für die Experten ist aber eine wirklich minimal-invasive Bypass-Operation: eine Koronar-Chirurgie im geschlossenen Brustkorb am schlagenden Herz. Da herkömmliche endoskopische Instrumente hierfür nur begrenzt taugten, setzten einige Wissenschaftler auf endoskopische Chirurgie-Robotersysteme. Die chirurgischen Instrumente werden nicht mehr direkt von der Hand des Operateurs geführt, sondern von einem durch ihn ferngesteuerten Roboter. Der Operateur hat dabei eine dreidimensionale Sicht in der Brusthöhle, und seine Handbewegungen an der Computerkonsole werden präzise auf die chirurgischen Instrumente im Brustkorb übertragen. Zusätzlich filtert der Computer jegliches Zittern der Hände heraus, was die Bewegungen sogar genauer als in Wirklichkeit macht.



Bei robotergestützen Bypass-Operationen sitzt der Operateur (links) an einer Fernsteuerungseinheit seitlich vom Patienten. Ein Bildschirm (links oben) erlaubt den anderen Mitgliedern des Operationsteams, jeden Schritt zu verfolgen.

PETER MENZEL

Die Vorteile solcher Robotersysteme für Operationen im geschlossenen Brustkorb – allerdings noch unter Einsatz einer Herz-Lungen-Maschine – nutzten erstmals 1998 Friedrich Mohr, Volkmar Falk und Anno Diegler vom Herzzentrum der Universität Leipzig sowie Alain Carpentier und Didier Loulmet am L'hôpital Broussais in Paris. Um doch noch den ursprünglichen Heartport-Ansatz mit stillgelegtem Herz umzusetzen, kombinierten sie ihn nämlich mit dem Robotersystem „da Vinci" für Schlüsselloch-Chirurgie (Foto Seite 51). Entwickelt hat es die Firma Intuitive Surgical in Mountain View (Kalifornien).

Ein anderes chirurgisches Robotersystem, „Zeus" genannt, entwickelte das Unternehmen Computer Motion in Goleta (Kalifornien). Damit operierte im September 1999 Douglas Boyd am Gesundheitszentrum der Universität von Western Ontario im amerikanischen London erstmals computergestützt am schlagenden Herz im geschlossenen Brustkorb. Dieser minimal-invasive Eingriff beanspruchte fast den ganzen Tag – statt nur rund zwei Stunden wie eine vergleichbare Einfach-Bypass-Operation über einen begrenzten, etwa handbreiten Hautschnitt am schlagenden Herz. Zur Jahresmitte 2000 allerdings hatten Chirurgen an fünf Zentren – in München, Leipzig, Dresden, London (Ontario), London (England) – die Zeit auf drei bis fünf Stunden verkürzt, und zwar nach etwa zwei Dutzend erfolgreich verlaufenen Einfach-Bypass-Operationen dieser Art.

Robotersysteme wie diese werden sicherlich eines Tages zur Standardausrüstung eines Operationssaals gehören. Mit dem weiteren technologischen Fortschritt dürften irgendwann auch geeignete Simulatoren zur Verfügung stehen; chirurgische Assistenzärzte könnten daran endoskopische Operationen der Herzkranzgefäße üben, ähnlich wie Piloten heute schon das Fliegen, und gestandene Operateure könnten anstehende Eingriffe „auf dem Trockenen" erproben. Weitere Neuerungen werden die chirurgische Behandlung der koronaren Herzkrankheit vereinfachen, etwa ein gerade in Entwicklung befindlicher „Schnappverschluss": Er soll ein transplantiertes Gefäß schnell – und ohne zu nähen – mit dem vorhandenen verbinden.

Denkbar ist, dass schließlich einmal andere Maßnahmen koronare Bypass-Operationen überflüssig machen. Bis dahin aber gilt es weiterhin, die Koronar-Chirurgie zu verbessern und sie möglichst kostengünstig zu gestalten. Denn solche Fortschritte eröffnen einem weltweiten Patientenkreis – insbesondere auch in ärmeren Ländern – dringend benötigte Therapiemöglichkeiten für die Erkrankungen der Herzkranzgefäße. An erster Stelle muss jedoch auch in Zukunft stets – ungeachtet medizinisch-technischer Fortschritte – die Vermeidung der koronaren Herzkrankheit stehen. ■

Cornelius Borst *ist Professor für experimentelle Kardiologie am Medizinischen Zentrum der Universität Utrecht in den Niederlanden. Er absolvierte seine medizinische Ausbildung an der Universität Amsterdam, wo er auch seinen Doktortitel erwarb. 1981 wurde er Vorsitzender des Laboratoriums für experimentelle Kardiologie in Utrecht. Seine weiteren Forschungsinteressen erstrecken sich unter anderem auf die Mechanismen arteriosklerotischer Gefäßverengung und den Wiederverschluss nach Ballon-Dilatation.*

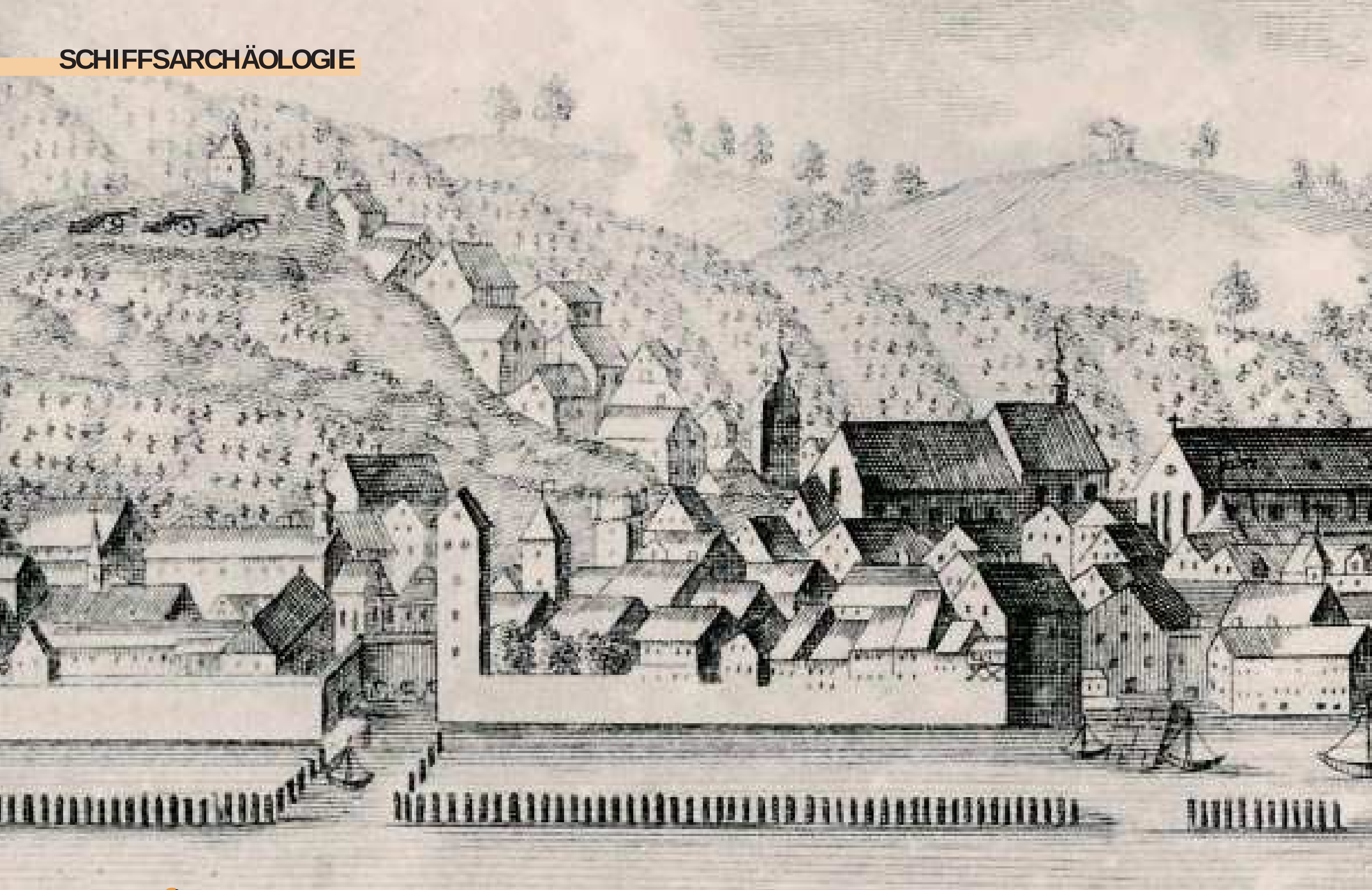
Literaturhinweise

Minimalinvasive Techniken in der Gefäß- und Herzchirurgie. Von Ralf Kolvenbach (Hg.) Steinkopf Verlag, Darmstadt 1999.

Die Bypass-Operation – neue Entwicklungen. Von Friedrich W. Mohr und Volkmar Falk in: Zeitschrift der Deutschen Herzstiftung, 17. Jg., Heft 32, S. 12 (1997).

Minimally Invasive Coronary Artery Bypass Grafting: An Experimental Perspective. Von Cornelius Borst und Paul F. Gründeman in: Circulation, Bd. 99, Nr. 11, S. 1400, 23. März 1999.

Hinweise unter ***www.spektrum.de/aktuellesheft.html***



Auf Wracksuche im Bodensee

Jahrhundertelang diente Deutschlands größter Binnensee als Drehscheibe für den überregionalen Handel, doch die Geschichte seiner Schifffahrt ist kaum bekannt.

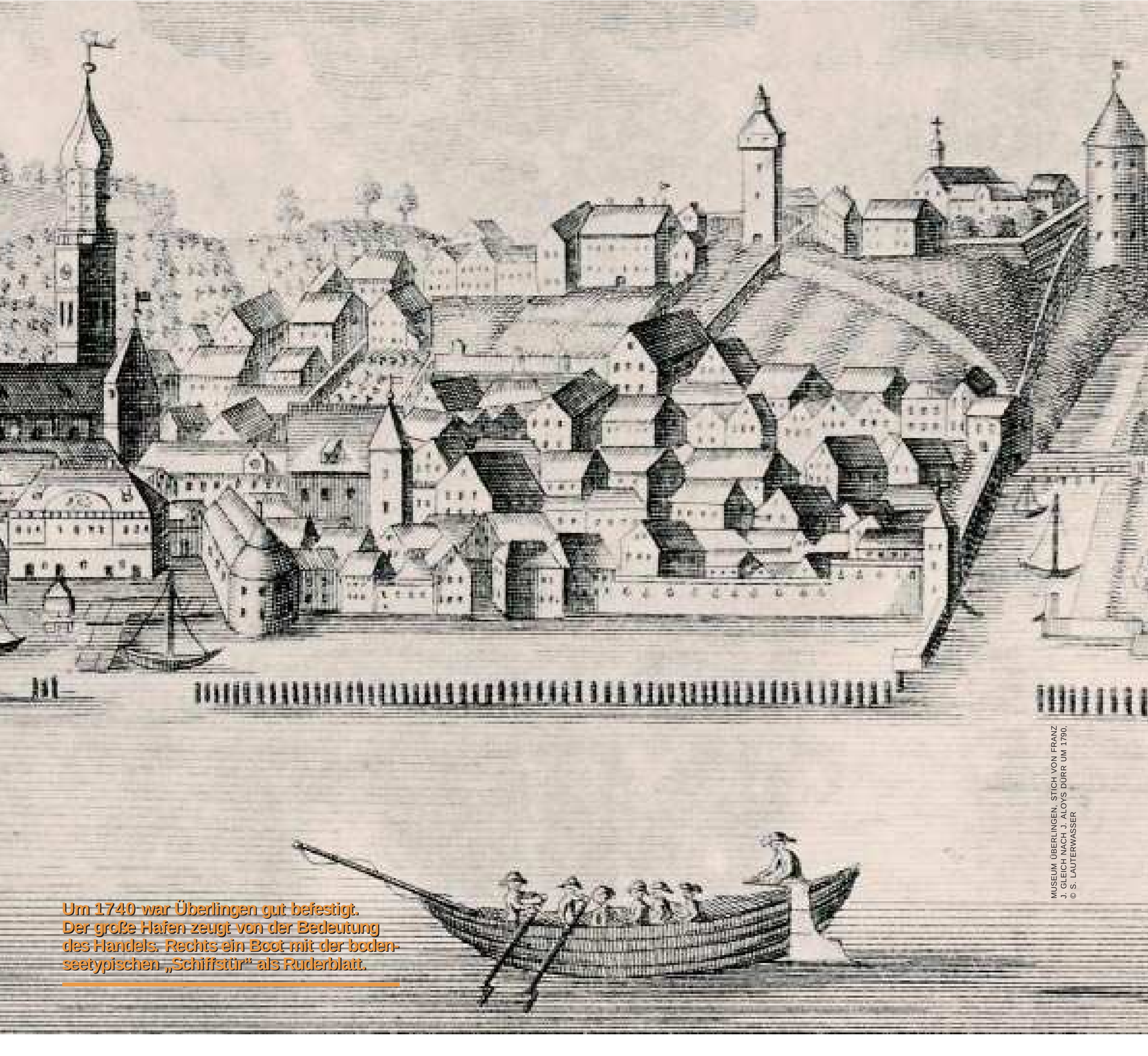
VON KLAUS-DIETER LINSMEIER

Lang streckt sich der Bodensee in eine eiszeitliche Mulde des Alpenvorlands. 571,5 Quadratkilometer Wasserfläche, im Obersee bis 254 Meter tief, nach Nordwesten in den flacheren Untersee bei Konstanz und den Überlinger See auslaufend – kein Wunder, dass der Volksmund Deutschlands größten Binnensee auch das „schwäbische Meer“ nennt. Wer hier Ferien macht, genießt landschaftliche Schönheit und Wassersportmöglichkeiten. Wer hingegen ein Ziel jenseits des Sees ansteuert, dem ist das Gewässer ein Verkehrshindernis, das meist zeitaufwendig auf Bundesstraßen umrundet werden muss.

Das war nicht immer so. Von einer Anhöhe des Überlinger Sees blicke ich hinunter auf die schimmernde Wasseroberfläche und beobachte Segelboote. In der Ferne kreuzen Autofähren zwischen Konstanz und Meersburg. Welcher Anblick hätte sich mir wohl in der Vergangenheit geboten?

Der Bodensee im Mittelalter: Segel über Segel, nicht so elegant wie bei heutigen Freizeitbooten, sondern rechteckig. Gut geeignet, um vor dem Wind zu segeln, ungeeignet jedoch für das Kreuzen dagegen. Flachbodige Holzschiffe befördern eine Vielzahl von Waren. Legt dort unten nicht gerade ein kleiner Segler ab? Vielleicht transportiert er Korn von den umliegenden Ländereien nach Rorschach und weiter rheinaufwärts bis nach Chur in Graubünden? Aus Richtung Schaffhausen hält ein anderes Schiff auf den Ort zu, der seit 1180 das Marktrecht hat. Der hölzerne Rumpf könnte Produkte aus Schweizer Anbaugebieten bergen. Der Wind steht heute aber nicht günstig für dieses Schiff, die Besatzung hat bereits zu den Rudern gegriffen.

Nicht Verkehrshindernis ist der See, sondern Drehscheibe für den lokalen Gütertransport wie auch für den Fernhandel. Wer es eilig hat, der vertraut seine Waren Schiffern an, statt den mühsameren Wegen und schlechten Landstraßen zu folgen. Auf dem Wasser kommt man allemal schneller voran, zudem vermögen Boote mehr Ladung zu tragen als Menschen oder Ochsenkarren. An diesem Zustand wird sich für die



Um 1740 war Überlingen gut befestigt. Der große Hafen zeugt von der Bedeutung des Handels. Rechts ein Boot mit der bodenseetypischen „Schiffstür" als Ruderblatt.

MUSEUM ÜBERLINGEN, STICH VON FRANZ J. GLEICH NACH J. ALOYS DÜRR UM 1790, © S. LAUTERWASSER

nächsten Jahrhunderte nichts ändern. Überdies bietet der Fischfang eine wichtige Ernährungsgrundlage. Das wussten schon die Menschen der Jungsteinzeit, die seit dem 4. Jahrtausend v. Chr. vor allem an Untersee und Überlinger See ihre Pfahlbauten errichtet haben; mit Einbäumen, vielleicht auch Fellbooten, befuhren sie den sumpfigen Uferbereich.

Um die Zeitenwende kannten die heute gern als Kelten bezeichneten Völker in diesem Raum Plankenboote, Einbäume und Flöße. Der antike Historiker Strabon (etwa 64 v. Chr. – 20 n. Chr.) erwähnte sogar eine Schlacht auf dem Bodensee, die der Feldherr und spätere römische Kaiser Tiberius (42 v. Chr. – 37 n. Chr.) bei seinem Alpenfeldzug gegen die keltischen Vindeliker zu schlagen hatte. Archäologen halten diese Schilderung einer Seeschlacht zwar für übertrieben, eine militärische Aktion zu Wasser aber für wahrscheinlich.

Auch für spätere Zeiten erwiesen sich die Römer als auskunftsfreudige Zeugen ihrer Zeit. So verzeichnet die militärische Verwaltungsschrift *Notitia dignitatum* für die Zeit um 400 n. Chr. eine römische Flottille in Brigantium, dem heutigen Bregenz. Das Kastell dort bildete mit Tasgaetium (Eschenz), Confluentes (vielleicht das heutige Konstanz?) und Arbor felix (Arbon) einen Teil des spätantiken Limes am Südufer des Sees; die Befestigungen schützten die seinerzeit von Tiberius eroberte Provinz Raetia vor den Alemannen. Ausgrabungen von Pfahlfundamenten einer antiken Kaimauer in Bregenz und die Datierung ihrer Hölzer mittels Dendrochronologie bestätigten diese Angabe des antiken Dokuments.

Gab es schon damals einen regen Schiffsverkehr auf dem See? Ein Besucher im Hafen von Brigantium hätte vermutlich neben flachbodigen Lastbooten auch schnelle Patrouillenboote vor Anker liegen sehen. Entsprechende Wracks fand man jedenfalls in Oberstimm an der Donau und antike Lastkähne am Neuenburger See.

Im frühen Mittelalter waren die Ruinen der römischen Anlagen noch gut sichtbar gewesen; sie zeugten von einstiger Größe und Macht – und dienten als ▶

Steinbrüche. Dichte Wälder und Sumpflandschaften beherbergten Wild und Wasservögel. Ein weiterer Puzzlestein der Schiffsarchäologie: Um 610 setzten die irischen Wandermönche Columban und Gallus, die das Christentum an den See gebracht hatten, von Arbon nach Bregenz über, um dort ein Kloster zu gründen. Ihre Überfahrt hat der Reichenauer Abt Walahfried Strabo 833 in seiner *Vita Sancti Galli* beschrieben. Der St. Gallener Mönch Konrad Sailer malte diese Fahrt 1451 und überlieferte damit Merkmale der Schiffstechnik des Mittelalters – einen flachen Rumpf, an beiden Enden hochgezogen, der über Fahr- und Ziehruder gesteuert beziehungsweise fortbewegt wird (Bild unten).

Das Schiff auf dieser Darstellung stimmt mit dem bislang einzigen archäologisch gut untersuchten Schiffswrack am Bodensee weitgehend überein. Der See hat es jahrhundertelang bewahrt. Vom Sediment begraben und damit unter Abschluss von Sauerstoff bleibt organisches Material wie Holz von Zersetzung weitgehend verschont; von Wasser bedeckt, wird sie immerhin verlangsamt. Eigentlich hatte der Entdecker dieses Schiffs, der Archäologe Dietrich Hakelberg, heute am Institut für Ur- und Frühgeschichte der Universität Freiburg, 1981 in der Flachwasserzone des Kippenhorns bei Immenstaad nach Resten von Pfahlbauten gesucht. Diese Landzunge liegt etwa dreißig Kilometer südöstlich von meinem Beobachtungsposten auf der Anhöhe bei Überlingen entfernt.

Hakelberg fand das erste Wrack eines mittelalterlichen Holzschiffs am Bodensee. Gemeinsam mit dem Archäologen Michael Kinsky hat er es im Auftrag des Landesdenkmalamtes Baden-Württemberg 1991 ausgegraben und so vor der Zerstörung durch Renaturierungsarbeiten in der Flachwasserzone gerettet.

Archäologen in Gummistiefeln

„Beim Landesdenkmalamt Baden-Württemberg gab es keine Experten für die Schiffsarchäologie“, sagt Hakelberg. „Mit dem Schiffswrack von Immenstaad betraten wir Neuland. Unsere Methoden hatten wir in der Pfahlbauarchäologie entwickelt.“ Insbesondere Helmut Schlichtherle von der Außenstelle Hemmenhofen des Landesdenkmalamtes und seine Mitarbeiter arbeiten seit 1971 an der Erfassung und Ausgrabung von „Pfahlbauten“, den Ufer- und Moorsiedlungen der Jungsteinzeit und Bronzezeit. Und so gehen die Wissenschaftler vor: Ein Sandsackdamm schirmt das Wrack gegen den See ab, eine Hälfte wird so weit trocken gelegt, dass die Archäologen in Gummistiefeln weiterarbeiten können. Das dendrochronologische Labor in Hemmenhofen datiert später eine Holzprobe auf das 14. Jahrhundert.

In diesem Jahr erhält das geborgene und konservierte Wrack – das eigentlich nur noch aus dem flachen Boden und einem Teil der Seitenwände des Schiffes besteht – samt einem von Hakelberg rekonstruierten Modell (Bild rechts unten) einen eigenen Anbau am Archäologischen Landesmuseum in Konstanz. Der Wissenschaftler resümiert: „Das Immenstaad-Wrack war ein Glücksfall, weil es so leicht zugänglich war. Der Nachbau im Modell half uns, technologische Einzelheiten besser zu verstehen und zu rekonstruieren. Natürlich tauchten auch neue Fragenstellungen zur Schiffsbauweise auf, die wir bei zukünftigen Funden auch in größeren Wassertiefen gezielter angehen können.“

Anfang der neunziger Jahre äußerte der Schweizer Archäologe Béat Arnold vom Musée Cantonal d’archéologie in Neuchâtel die Vermutung, mittelalterliche und neuzeitliche Schiffe nördlich der Alpen gingen auf römischen Lastsegler des Neuenburger Sees zurück. Offenbar hatten die Handwerker für diese flachbodigen, kiellosen Schiffe seinerzeit eine Technik erfunden, die Arnold als Grundplattenkonstruktion bezeichnete. Schiffe mit Kiel entstehen nämlich in Schalen- oder Skelettbauweise: Entweder werden vom Kiel ausgehend zuerst die Bordwände aus Planken aufgebaut und dann die stabilisierenden Querhölzer – die Spanten – eingesetzt, oder der Schiffsbauer errichtet umgekehrt aus Kiel und Spanten ein Gerüst, an das er dann die Planken anschlägt. Bei der Grundplattenkonstruktion hingegen begannen die Handwerker mit dem flachen Boden, den sie dann vorn und hinten hochzogen (Bild rechts oben); sie montierten die Seitenwände und zogen schließlich Querhölzer ein. Diese Bauweise hatte einen guten Grund: Der Boden durfte und musste flach sein, denn einen Hafen mit Landungsmole fanden die Schiffer bis in das 19. Jahrhundert keineswegs überall vor, wohl aber Flachwasserzonen, darin einfache Stege zum Be- und Entladen.

Weil der Kiel auch Biegesteifigkeit verleiht, mussten andere Elemente diese Funktion bei der kiellosen Grundplattenkonstruktion übernehmen. Beim Immenstaader-Schiff – wie wohl bei vielen mittelalterlichen Schiffen – sorgten dafür so genannte Übergangsplanken: Aus zwei Eichenstämmen arbeiteten die Handwerker L-förmige Profile heraus, die über die volle Schiffslänge von etwa zwanzig Metern die Kante zwischen dem Boden



STIFTSBIBLIOTHEK ST. GALLEN, CODEX 602, 33

Die Miniatur von Konrad Sailer aus St. Gallen aus dem Jahre 1451 illustriert die Fahrt der irischen Mönche Columban und Gallus von Arbon nach Bregenz. Der dargestellte Schiffstyp dürfte recht typisch für das Mittelalter sein.

und den Seitenwänden des Schiffs bildeten. Vermutlich hatten die Erbauer dann nur jeweils eine Seitenplanke angeschlagen, und zwar „klinker“, das heißt, die Übergangsplanke überlappend. Aus Ästen und Wurzeln geeigneter Form schlugen sie mit dem Beil L-förmige Spanten heraus, und setzten sie mit geraden Bodenhölzern abwechselnd ein (am Bodensee spricht man in diesem Zusammenhang von „Rangen“ und „Nadeln“). Zur Befestigung verwendeten die Handwerker ausschließlich konische Holznägel, die sie von außen durch Bohrungen schlugen; der Überstand wurde dann gespalten, ein Keil eingetrieben und dieser anschließend bündig mit der Oberfläche abgehauen, wie Hiebspuren in den Planken noch heute zeigen.

Auch der Alltag der Schiffer hat Spuren hinterlassen. Zwar dichteten Leinenwerg und vermutlich auch Pech den Rumpf ab, dünne Buchenbrettchen schützten die Fugen von außen. Doch Mulden im Holz an der tiefsten Stelle des Rumpfes zeugen von der täglichen Schöpfarbeit. Übrigens verwendeten die Zimmerleute für die Fugenbretter ausnahmsweise Eisennägel. Das Leinenwerg ist eine Besonderheit der Bodenseeregion: Gewöhnlich hatte man zur Dichtung Moos oder geteerte Tierhaare benutzt; doch der Anbau von Hanf und Flachs und die Tuchproduktion waren im Mittelalter ein florierender Wirtschaftszweig, der beispielsweise den Bürgern von Konstanz einigen Reichtum brachte.

Zum Antrieb des Immenstad-Schiffes lassen sich natürlich nur Vermutungen anstellen. In ein Spantpaar im vorderen Drittel des Rumpfes wurde eine „Mastspur“ eingestemmt, also eine Vertiefung zur Aufnahme des Mastfußes. Eine Besegelung des Schiffes beweist das nicht, macht sie aber sehr wahrscheinlich. Auf Bildern ab dem 16. Jahrhundert tragen Boote rechteckige Rahsegel, ebenso ähnlich gebaute Segelschiffe der Loire und der französischen Kanäle des 19. Jahrhunderts. Der Mast war vermutlich etwa zehn Meter hoch, bei den Rheinbrücken von Konstanz oder Bregenz mussten ihn die Schiffer umlegen können. Wurde er mittels Spannseilen und Taljen genannten Flaschenzügen hochgehievt und gespannt? Mit einer ähnlichen Vorrichtung hätten die Bootsleute auch das Segel hissen können. Bei Flaute oder in Ufernähe ruderten sie offenbar: Bohrungen in den Seitenplanken dürften einst Ruderringe aus Weidenruten, Hanf oder Ochsenschwanz als Führung getragen haben. Zu diesen Fahrrudern kam – wie auf der St. Gallener Abbildung zu sehen – noch ein Steuerruder am Heck.


EIDGENÖSSISCHE CHRONIK VON WERNER SCHODOLER, 1514. GEMEINDEARCHIV BREMGARTEN, AARGAU, SCHWEIZ

Wie hier am Zürichsee dürften auch am schwäbischen Meer die flachbodigen Boote gebaut worden sein.


ARCHÄOLOGISCHES LANDESMUSEUM KONSTANZ

So könnte ein Segler des Mittelalters ausgesehen haben. Der Freiburger Archäologe Dietrich Hakelberg rekonstruierte das 1:10-Modell anhand des Wracks von Immenstaad.

Die Seitenhöhe maß mittschiffs vermutlich 1,10 Meter. Der Schiffsbauingenieur Johannes Leidenfrost berechnete die Ladefähigkeit des rekonstruierten Immenstaad-Schiffes, wobei er die Stabilität der Konstruktion bei Sturm mitberücksichtigt hat. Er kam dabei auf eine Tragfähigkeit von 17 bis 21 Tonnen.

Das Verhältnis von Länge zu Breite des Flachbodens betrug 1:8, und das entspricht den kleineren Segelschiffen jüngerer Zeit – den „Segnern“. Ihre größeren Verwandten waren die „Lädinen“, die ein Vielfaches an Ladung transportieren konnten. In jedem Fall aber muss ihre Zahl immer stärker zugenommen haben. Denn während zu Anfang die Schifffahrt auf dem See noch weitgehend den Klöstern unterstanden hatte, bildeten sich eine Unmenge verschiedener Abfuhr- und Fährrechte. Seit dem Hochmittelalter organisierten sich die Schiffsleute in städtischen Zünften, um ihre Rechte zu wahren. Zeitgenössische Schätzungen über die Zahl kennen wir leider nicht.

Gutes Holz wird Mangelware

Immerhin erlauben Schriftquellen, die Gebrauchsdauer der Fahrzeuge zumindest grob zu bestimmen: Etwa 15 Jahre lang waren sie demnach in Betrieb, dann benötigte der Schiffer ein neues Boot. Und auch während dieser Zeit gab es viel zu reparieren. Das hatte schon im 10. Jahrhundert Folgen: Altes Eichenholz, das beste Baumaterial für Schiffe, wurde in der Region Mangelware. Genauere Daten gibt es für Bauholz aus dem Konstanz des 13. und 14. Jahrhundert: 80 Prozent stammt von Eichen, die jünger als 70 Jahre waren; davon war die Hälfte Stangenholz, aus den Stockausschlägen älterer Baumstümpfe. Zum Vergleich: ▶



FOTOS: KLAUS-DIETER LINSMEIER

Das Forschungsschiff „August Thienemann“ ist vollgepackt mit Sensorik. Am Heck erkennt man das Sidescan-Sonar (gelb). Forschungstaucher Adalbert Müller bereitet seinen Einsatz vor (oben rechts). Auch mit dem ferngesteuerten Unterwasserfahrzeug (ROV) wird das Wrack angetaucht, um Videoaufnahmen zu machen (links beim Wassern).

die Übergangsplanken des Immenstaad-Schiffes hatte man aus zwei mehr als hundert Jahre alten Eichenstämmen gearbeitet. Wie gingen die Menschen mit dieser Situation um? Haben sie die Lage erkannt und eine so genannte Mittelwaldwirtschaft betrieben, bei der einzelne Eichen etwa für den Schiffbau geschont wurden, während sie für einfachere Zwecke Stangenholz schlugen? In jedem Fall kannten sie das Recycling, wie die Ausgrabung einer mittelalterlichen Sickergrube in Überlingen zeigte: Sie förderte Plankenfragmente eines Schiffes zu Tage. Auch das Boot von Immenstaad dürfte nach Ansicht der Archäologen nicht gekentert sein. Vermutlich hat man es als Wrack an Ort und Stelle geschleppt und dann alles Brauchbare abgebrochen. Die flache Bodenkonstruktion blieb zurück.

An meinem Beobachtungsposten oberhalb von Überlingen setze ich nun meine Zeitreise fort in das 16. Jahrhundert. Das Bild hat sich nicht sehr geändert. Das Überlinger Münster nimmt mehr und mehr die heute bekannte, auf dem See weithin sichtbare Gestalt an. Doch es verkehren noch mehr Schiffe, und manche kommen von weit her. Denn der Bodensee ist inzwischen Teil eines Netzes von Verkehrswegen, das Rhein und Donau ebenso einschließt wie den Zürich- und den Walensee am nördlichen, den Lago di Como und den Lago Maggiore am südlichen Alpenrand. Für das späte 16. Jahrhundert belegen Warenverzeichnisse den Transport italienischer Produkte auf dem Alpenrhein, mit Reis, Olivenöl, Pomeranzen und Limonen. Im Jahre 1764 listet ein Schaffhauser „Schiffsrödel“ Kaffee, Zucker und Gewürze auf, die aus den niederländischen Kolonien stammen. Vom Bodensee aus führen jetzt auch Handelsstraßen über die Wasserscheide zur Donau und damit Richtung Osten.

Noch etwas fällt mir auf: Die Segler haben sich verändert, scheinen bauchiger zu sein und größer. Könnte ich einer Möwe gleich den See aus großer Höhe betrachten, würde mir wohl auch auffallen, dass sich die Handelsrouten verlagert haben. Eine aggressive Zollpolitik Österreichs, das in dieser Zeit am Nordufer des Sees viele Territorien besitzt, fördert zwar den Transitverkehr über Wasser. Doch die alten Reichsstätte Konstanz und Lindau haben dabei an Bedeutung verloren. Je nach der momentanen Lage ist es nun günstiger, Waren nach Österreich über die Schweizer Eidgenossenschaft zu befördern. Das gilt vor allem während der Kriege im 16. und 17. Jahrhundert, da sich Handelssperren zwischen den Großmächten durch den Transport über die neutrale Schweiz umgehen lassen.

Auch von jener Zeit legt ein Wrack Zeugnis ab. Es ist allerdings noch weitgehend von Sediment bedeckt und noch nicht eingehend untersucht: das „Salzschiff“ von Unteruhldingen. Nur den wenigsten Fahrgästen der Weißen Flotte dürfte bekannt sein, dass sie beim Einlaufen in den dortigen Hafen ein Denkmal kreuzen. Einen von Tauchern geborgenen Spant datierte das dendrochronologische Labor von Hemmenhofen auf das Jahr 1557.

So einfach zu untersuchen wie das Schiff von Immenstaad ist das Unteruhldinger nicht, denn selbst im Winter liegt es noch etwa 2,50 Meter unter dem Wasserspiegel. Das ist eigentlich keine Tiefe für Forschungstaucher – die Pfahlbau-Unterwasserarchäologie spielt sich ebenfalls dort ab. Wieder ein Griff in die Kiste des Bewährten: Taucher setzen eine Rohrkonstruktion am Wrack zusammen und nutzen sie als Messrahmen. Fotos werden aufgenommen, Zeichnungen unter Wasser auf Plexiglasscheiben angefertigt und später auf Papier übertragen.

Demnach beträgt die Bootsbreite maximal sechs, die Länge rund 30 Meter, vergleichbar einer Lädinenvermessung von 1723. Wieder entdecken die Wissenschaftler einen flachen Schiffsboden, jedoch ohne Übergangsplanken. Vielmehr stoßen jeweils die unterste Planke einer Seite stumpf auf die äußerste des Bodens. Die seitlichen Plankengänge erweisen sich als „kraweel“ verzimmert, also ebenfalls stumpf aufeinanderstoßend. Die Forscher finden etwa 40 Zentimeter lange geschmiedete Eisennägel.

Als Steuerruder trug das Unteruhldinger Schiff wahrscheinlich eine „Schiffstür“: ein großes, seitliches Ruderblatt. Diese Eigentümlichkeit des Bodensees kam Abbildungen zufolge im 16. Jahrhundert auf und war auch noch Anfang

LITHOGRAPHIE VON EBERHARD EMMINGER, WÜRTTEMBERGISCHE LANDESBIBLIOTHEK STUTTGART



Das Dampfschiff „Wilhelm“, hier beim Einlaufen in Friedrichshafen, markierte den Anfang vom Ende für die Bodensee-Segler.

des 20. Jahrhunderts in Gebrauch. Aus mehreren Bohlen zusammengesetzt hat man dieses Ruder in eisernen Scharnieren befestigt und mittels einer langen Pinne geschwenkt (Bild Seite 56/57).

Warum die neue Konstruktionsweise? War der Übergang zur Kraweeltechnik ein Zeichen technologischen Fortschritts, oder fehlten schlicht die alten Eichen für Übergangsplanken? Weitere Schiffsfunde und eingehendere Untersuchungen sind vonnöten, um diese Fragen zu klären.

Vielleicht liefert ein Wrack neue Indizien, das im Sommer 2000 sozusagen neu entdeckt wurde. Ein Sporttaucher hatte es schon Anfang der Achtziger im Überlinger See gefunden, fotografiert, einen Spant geborgen und das Landesdenkmalamt informiert. Artefakt und Bilder ließen vermuten, dass das fragliche Schiff mit „Übergangsplanken“ gebaut worden sein könnte. Stammt es aus dem Mittelalter oder wurde diese Technik auch später noch verwendet? Eine Datierung mittels Dendrochronologie scheiterte. Mehrere Anläufe, das Schiff zu lokalisieren, verliefen ebenfalls erfolglos.

Mein Blick schweift nach Norden, Richtung Sipplingen. Dort lag im Sommer die „August Thienemann“ vor Anker, ein Forschungsschiff des Instituts für Seenforschung in Langenargen. Linker Hand ragt eine beeindruckende Wand aus Molasse auf, dem weichen Gestein, das vor Millionen Jahren aus Sedimentablagerungen entstand und aus dem die letzte Eiszeit das Seebecken formte. Davor schimmert grünlich der Flachwasserbereich, der abrupt in einen Steilhang abbricht, der hier etwa 80 Meter tief abfällt. Kein einfaches Terrain für die Forschungstaucher, wie mir die freiberuflich tätigen Unterwasserarchäologen Martin Mainberger und Adalbert Müller an Bord erläutern. Mehr als 30 Meter tief soll das Wrack in der Steilwand liegen. Dort unten herrschen Dunkelheit, vermutlich eine Sicht von bestenfalls ein bis zwei Metern und Temperaturen von vier Grad.

Dazu kommt ein vierfach höherer Druck im Vergleich zur Oberfläche. Moderne Atemgeräte regeln den Druck der Atemluft automatisch hoch, sodass die Lunge nicht kollabiert. Infolgedessen löst sich aber mehr Stickstoff im Blut. Lässt der Druck dann zu schnell wieder nach, etwa bei zu raschem Auftauchen, kann das Gas wie Kohlendioxid in einer geöffneten Mineralwasserflasche ausperlen. Verschluss von Blutgefäßen durch Luftbläschen wäre die Folge. Wer länger in solchen Tiefen bleibt und dementsprechend höhere Stickstoff-Konzentrationen in Blut und Geweben erreicht, muss beim Auftauchen „Dekompressions“-Stops einlegen, bei denen das gelöste Gas abgeatmet wird. Forschungstauchern sind aber solche Deko-Tauchgänge seitens der Berufsgenossenschaft verboten. Deshalb stehen Martin Mainberger, der als Erster hinunter gehen soll, nur zehn Minuten auf der Maximaltiefe zur Verfügung.

„Heidenhöhlen“ nannte man im 19. Jahrhundert diese aus dem Mittelalter stammenden Unterkünfte. Heute ist davon nicht mehr viel übrig, denn zum Bau der Bodensee-Eisenbahnlinie wurde ein großer Teil des Molasse-Felsens abgesprengt. Im Hintergrund der Ort Sipplingen und eine Lädine, ein großer Segler, der in vielen Details mittelalterlichen Schiffen ähneln dürfte.



MUSEUM ÜBERLINGEN, STICH VON C. M. KURZ NACH K. CORRADI, 1850, © S. LAUTERWASSER

Warum soll ein Mensch überhaupt die Risiken eingehen, die mit so tiefen Tauchgängen in unseren Seen verbunden sind (und die vielen Sporttaucher nicht bewusst sind)? Die Antwort gibt mir Mainberger selbst: „Wir konnten den Tauchroboter der „Thienemann“ nicht mit der Videokamera hinunterschicken, da es Probleme mit der Motorsteuerung gab. Außerdem haben wir die Steilhalde auch schon gründlich mit dem Sidescan-Sonar abgesucht, leider ohne deutliche Ergebnisse. Vielleicht besteht das Wrack nur noch aus Einzelteilen, die sich im Schallbild nicht gegen den Untergrund abzeichnen. Deshalb gehen jetzt wir Taucher runter.“

Wrack gefunden!

Ich lerne eine Grundregel des Forschungstauchens: Gearbeitet wird im Team aus Einsatzleiter, Arbeitstaucher und Reservetaucher für den Notfall. Kommuniziert wird über eine einfache Signalleine: Ein Ruck von oben fragt nach, ob alles in Ordnung ist, viermal Rucken gibt das Signal zum Austauchen. Jedes Signal muss in gleicher Weise vom Taucher beantwortet werden. Dreimal Zug von unten bedeutet: Wrack gefunden.

Und dann wird es spannend. Der promovierte Archäologe lässt sich ins Wasser fallen und paddelt mit den Flossen zu einer Boje, etwa 50 Meter vom Schiff entfernt. Sie markiert das linke Ende des Untersuchungsgebiets. Das an ihr hängende Gewicht sollte in der Zieltiefe auf Grund liegen. Der Plan lautet: Abtauchen am Bojenseil, dann den Steilhang auf der Zieltiefe queren und dabei die Boje für den nächsten Tauchgang mitnehmen bis zum Wrack. Dann Aufsteigen am Bojenseil. Das soll vor allem die Orientierung im dunklen, trüben Wasser erleichtern – Oben und Unten sind in der lichtlosen Tiefe für den Taucher kaum unterscheidbar.

Doch es kommt anders: Die Boje wackelt zwar ein wenig, bleibt aber an Position, während Mainberger – erkennbar an den Luftblasen, die zur Oberfläche aufsteigen – offensichtlich den Steilhang entlang taucht. Spannung an Bord. Dann das Signal: Wrack gefunden! Der Einsatzleiter befiehlt „Austauchen“, denn die zehn Minuten sind verstrichen. Doch irgendetwas scheint nicht zu stimmen: Er gibt immer mehr Leine ins Wasser. Vermutlich habe sich diese am Grund verheddert, erläutert er und schickt den Reservetaucher los. Der taucht kurz darauf wieder auf und ruft: „Leine straffen!“ Etwas später erreicht Martin Mainberger schwer atmend die Oberfläche.

Das erste Problem: Die Boje liegt nur neun Meter tief auf Grund, der Steilhang verläuft also anders als angenommen. Das zweite: Ihre Leine hatte sich so verhakt, dass der Taucher sie nicht entwirren konnte und das Gewicht liegen lassen musste. Als er dann das Wrack gefunden hatte – „Es sind nur Trümmer, aber ich habe ganz sicher eine Übergangsplanke gesehen.“ – wollte er statt am Bojenseil an der Sicherungs- und Kommunikationsleine Hand über Hand aufsteigen. Der Einsatzleiter interpretierte den resultierenden Zug aber falsch und gab Leine nach. So hatte Mainberger einige Mühe mit dem Aufstieg im Freiwasser. „Es war alles im grünen Bereich“, erklärt er später. „Doch solche Tauchgänge bestätigen, dass in unseren kalten und dunklen Gewässern Tauchen in solchen Tiefen gefährlich sein kann.“

Trotz aller Aufregung: Das Wrack ist endlich gefunden und über einen Schallgeber am Anzug des Tauchers sowie das GPS-System des Schiffes genau lokali- ▶


© S. LAUTERWASSER

Das Fass als Container der Lastensegler – hier im Überlinger Mantelhafen – war auch 1903 noch gefragt.

siert worden. „Vermutlich hat Wind das Schiff bei Niedrigwasser auf den Rand des Steilhangs gedrückt. Es ist gesunken, dann abgerutscht und dabei zerbrochen. Die Trümmer verfingen sich im Hang. Vielleicht liegen sogar weiter oberhalb noch Teile, möglicherweise sogar Ladung."

Der Ort inspiriert zu solchen Vorstellungen, erklärt Dietrich Hakelberg am nächsten Tag, während die Bootscrew den reparierten Tauchroboter fertig macht. Er deutet auf die Molassewand (Bild Seite 61). „Dort gab es im Mittelalter Wohnhöhlen, die erst 1846 beim Bau einer Uferstraße großteils weggesprengt wurden. Und dort drüben steht eine Kapelle, deren Wände Fresken aus dem 9. bis 10. Jahrhundert zieren. Das ergibt mit dem Wrack ein ganz interessantes Denkmalensemble. Vielleicht steht ja das Wrack mit Siedlung und Kirche in einer Beziehung." Hatten die Schiffsleute den Höhlenbewohnern Waren bringen wollen?

Leider erweist sich das Gelände wieder als zu schwierig. Zwar gelingt es, an der Position des Wracks eine Boje zu platzieren und an deren Halteseil den Roboter mit der Videokamera abzulassen. Doch am Steilhang lässt er sich nur schlecht manövrieren und wühlt zu viel Sediment für gute Aufnahmen auf. Auch ein weiterer Tauchgang bringt nur eine Bestätigung des Befundes vom Vortag. Erst ein erneuter Versuch im vergangenen Oktober lässt die Forscher jubeln: Sie bergen ein Stück Holz, sehr wahrscheinlich ein Teil der Ladung: Die Enden zeigen Sägespuren, die anderen Flächen sind durch Spalten eines dickeren Stücks entstanden. Die Länge von etwa 1,80 Meter Länge entspricht dem bis vor etwa 100 Jahren gebräuchlichen Klafter, einem Maß für Brennholz. Nun sind die Dendrochronologen gefordert, das Alter herauszufinden.

Theoretisch müssten entlang der Handelsrouten unzählige Wracks auf Grund liegen. In Kooperation mit dem Institut für Seenforschung in Langenargen versuchen die freiberuflichen Mitarbeiter des Landesdenkmalamtes sie mit dem Sidescan-Sonar zu orten und zu kartieren. Viele davon werden jüngeren Datums sein, doch bietet auch das 18. und 19. Jahrhundert Arbeitsfelder für Archäologen. Wieder sind es die gleichen Fragen: Welche Technik wandten die Schiffbauer an, in welchem wirtschaftlichen Kontext stand die Schifffahrt? Quellen des 18. Jahrhunderts zufolge befuhren rund 1000 Segelschiffe den Bodensee; davon waren 150 große Schiffe, Lädinen und Segner, der Rest waren meist kleinere Fischerboote. Leider hinterließen auch die Handwerker der späten Neuzeit keine Aufzeichnungen, sondern arbeiteten nach überlieferten Traditionen wie ihre Kollegen aus dem Mittelalter.

Noch einmal versuche ich mir den See in einer vergangenen Zeit vorzustellen: Das 19. Jahrhundert, landauf, landab zeugen Dampfwolken vom Anbrechen des Industriezeitalters. Und auch auf dem See stoßen Dampfschiffe Rauch aus. Das Jahr 1824 bringt die Zeitenwende für die Segelschifffahrt auf dem Bodensee: Das erste Dampfschiff, die „Wilhelm", nimmt den Verkehr von Friedrichshafen nach Rorschach auf (siehe Seite 60 unten). Bald folgen weitere, zunächst noch ganz aus Holz, die Maschinen sind aus Liverpool importiert. Obwohl Segner mittlerweile mindestens 44 und Lädinen bis zu 150 Tonnen tragen, sind ihnen diese Kraftpakete überlegen, denn die fahren auch bei Flaute und starkem Wind. Anfangs wehren sich die Segelschiffleute. Die Zünfte in Lindau versuchen, die dampfbetriebene Konkurrenz mit ihren mittelalterlichen Abfuhrrechten auszubremsen – sie fordern einfach hohe Hafengelder. Doch 1841 kauft der bayerische Staat diese Rechte und bereitet dem Industriezeitalter den Weg. Als dann die Eisenbahn den Bodensee erschließt, können die Dampfschiffe eher mit dem neuen Transportmedium kooperieren. Fotos zufolge sind zwar sogar am Anfang des 20. Jahrhunderts noch kleinere Segner in Gebrauch. Sie befördern aber nur noch Massengüter wie Baumaterial oder Brennstoff. Ihre hohe Zeit ist vorbei. Die der Schiffsarchäologie am Bodensee bricht aber sicher erst noch an.

Von meiner Warte auf der Anhöhe beobachte ich noch eine Weile das bunte Treiben im modernen Überlingen. In dem alten Handelshaus am Hafen, der „Greet", werden heute schnelle Speisen gehandelt. In den Gräben um die alte Stadtmauer lustwandeln Kurgäste. Wo einst Frachtschiffe anliefen, entlassen Fähren nun Touristen. Könnten sich Tagesgäste wohl für die Verkehrsgeschichte des Sees begeistern? Zu wünschen wäre, dass zumindest Sporttaucher ein solches Interesse aufbrächten. Zwar verdanken Archäologen ihnen Hinweise, doch nicht jeder geht mit dem angetauchten Wrack sorgsam um, manche versuchten gar, ein „Souvenir" mitzunehmen. Das Landesdenkmalamt hofft, solchem Vandalismus durch Aufklärung vorbeugen zu können. Und durch ein bisschen Geheimniskrämerei. Es wäre schade, wenn noch mehr Zeugen einer großen Zeit der Schifffahrt am „schwäbischen Meer" durch Unachtsamkeit verloren gingen.

Klaus-Dieter Linsmeier *ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.*

Literaturhinweise

Einbaum, Lastensegler, Dampfschiff. Frühe Schifffahrt in Südwestdeutschland. Herausgegeben vom Archäologischen Landesmuseum Baden-Württemberg. Konrad Theiss Verlag, Stuttgart 2000.

Überlingen – Schlüssel zum Bodensee. Edition Braus, Heidelberg 1989.

Siedlungen der Steinzeit. Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung, 1989.

Essbare Impfstoffe

Jedes Jahr sterben Millionen Menschen, weil sie keinen Zugang zu traditionellen Impfstoffen haben. Vor allem viele Kinder könnten vor oft tödlichen Krankheiten bewahrt werden, wenn es gelingt, sie allein durch Essen von genetisch veränderten Bananen und anderen Früchten zu impfen.

VON WILLIAM H. R. LANGRIDGE

Im Kampf gegen Infektionskrankheiten haben Impfstoffe bisher wahre Wunder vollbracht. Dank ihrer Hilfe gehören Pocken-Epidemien der Vergangenheit an, und dasselbe könnte bald auch für Kinderlähmung gelten. Eine internationale Impfkampagne gegen die sechs wichtigsten Infektionskrankheiten – Diphtherie, Keuchhusten, Kinderlähmung, Masern, Tetanus und Tuberkulose – hat in den späten neunziger Jahren vermutlich immerhin 80 Prozent der Kleinkinder in aller Welt erreicht, im Vergleich zu fünf Prozent in den siebziger Jahren. Ohne sie fiele die jährliche Todesbilanz hierfür höher aus: um etwa drei Millionen Menschen

Doch sollten diese Erfolge nicht darüber hinwegtäuschen, dass eben noch immer 20 Prozent der Kinder von den Impfprogrammen gar nicht erreicht werden – und dies bedeutet mehr als zwei Millionen unnötige Todesfälle jedes Jahr, die meisten davon in den entlegensten und ärmsten Regionen der Erde. Zusätzlich gefährden politische Unruhen mancherorts die bisherigen Fortschritte. Außerdem sterben auch heute Millionen Menschen weltweit an Infektionskrankheiten, gegen die es bisher keine Impfstoffe gibt – oder nur zu teure oder unzuverlässige.

Diese Situation ist nicht nur für Regionen mit unzureichender Gesundheitsversorgung Besorgnis erregend, sondern für die gesamte Weltbevölkerung. Denn Herde für Infektionskrankheiten, die woanders praktisch nicht mehr vorkommen, gleichen Zeitbomben: Je näher die Kontinente durch internationalen Handel und Verkehr zusammenrücken, desto schneller wandern auch lokal ausbrechende Epidemien um die Welt.

Bereits Anfang der neunziger Jahre dachte Charles J. Arntzen – damals an der A&M-Universität in College Station (Texas) – über einen Weg nach, möglichst viele Kinder mit Impfstoffen zu versorgen. Er hatte von der Forderung der Weltgesundheitsbehörde nach preisgünstigen Schluckimpfungen gehört, die keine Kühlung benötigen. Kurz darauf, bei einem Besuch in Bangkok, sah er eine Mutter, die ihr weinendes Kind durch ein Stück Banane beruhigte. Das brachte ihn auf die Idee, Nutzpflanzen genetisch so zu verändern, dass sie in ihren genießbaren Teilen Impfstoffe produzierten. Diese könnten dann, wann immer nötig, einfach gegessen werden.



Diese Bananenstauden und Tomatenpflanzen in Gewächshäusern des Boyce-Thompson-Instituts für Pflanzenforschung an der Cornell-Universität sind genetisch aufgerüstet, damit sie in ihren Früchten Impfstoffe produzieren. Bananen erscheinen hierfür besonders attraktiv. Sie gedeihen in vielen Erdteilen, lassen sich roh verzehren und schmecken den meisten Kindern.

FOTOS: FOREST MCMULLIN

Impfstoffe vor Ort wachsen lassen

Zu diesem Zeitpunkt existierten bereits Verfahren, um ausgewählte Gene ins Erbgut einer Pflanze einzuschleusen. Wenn alles gut ging, produzierte diese gemäß der genetischen Bauanleitung die zugehörigen fremden Proteine. Warum sollte das nicht auch für Eiweißstoffe von Erregern gelingen, gegen die man den Körper immun machen möchte?

Die Vorteile wären enorm. Einheimische könnten die „transgenen“ Pflanzen vor Ort anbauen und mit den ihnen vertrauten Methoden günstig kultivieren. Da sich viele Nutzpflanzen leicht vermehren lassen, müssten die Farmer nicht für jede weitere Anbauperiode neue Pflanzen oder Samen kaufen. Auch würde der lokale Anbau logistische und ökonomische Probleme lösen, wie sie beim Kühltransport über große Distanzen und bei der Lagerung konventioneller Vakzine auftreten. Auch Injektionsnadeln könnten entfallen, die – abgesehen von den Kosten – bei mehrfacher Verwendung selbst wieder Infektionsgefahren bergen.

Allerdings stecken die Bemühungen, Arntzens Zukunftsvision zu verwirklichen, noch in den Anfängen. Die in den letzten zehn Jahren durchgeführten Tier-

experimente und kleinen Pilotstudien am Menschen lassen jedoch immerhin hoffen, dass essbare Impfstoffe wie gewünscht schützen. Auf Grund dieser Forschung spekulieren Experten auch über die Möglichkeit, mit solchen Impfstoffen Autoimmun-Erkrankungen zu unterdrücken. Hier greift das Immunsystem irrtümlich körpereigene Strukturen an, was zu schweren Gewebeschäden führt. Zu den „selbstzerstörerischen" Erkrankungen, die sich vielleicht verhüten oder mildern ließen, gehören der gewöhnlich früh auftretende Typ-I-Diabetes, die multiple Sklerose und die rheumatoide Arthritis.

Gleichgültig wie Impfstoffe gegen Infektionskrankheiten verabreicht werden, sie verfolgen alle das gleiche Ziel: Sie bereiten das Immunsystem auf bestimmte Krankheitserreger vor, sodass es sie bei späterem Kontakt rasch gezielt angreifen kann. Klassische Impfstoffe arbeiten entweder mit abgeschwächten lebenden Viren oder Bakterien, die sich nicht mehr richtig vermehren können und somit keine Gefahr für den zu impfenden Organismus darstellen, oder – alternativ – mit abgetöteten Keimen.

Der erstmalige Kontakt mit dem vermutlich eingedrungenen Erreger alarmiert das Immunsystem. Es verhält sich so, als ob der Organismus wirklich attackiert würde und mobilisiert seine verschiedenen Abwehreinheiten gegen den Eindringling. Dabei nimmt es bestimmte als fremd erkannte Proteinstrukturen ins Visier. Die erkannten Moleküle bezeichnet man als Antigene. Die erste schnelle Abwehrreaktion klingt zwar bald ab, doch es bleiben Wachpatrouillen zurück: die so genannten Gedächtniszellen. Bei Angriff des echten Erregers mobilisieren sie sofort eine Heerschar von Verteidigern, die prompt gezielte Abwehrmaßnahmen einleiten. Manche Impfungen verleihen praktisch lebenslange Immunität; andere, wie die gegen Cholera und Tetanus, müssen regelmäßig aufgefrischt werden.

Klassische Impfstoffe bergen immer ein kleines, aber beunruhigendes Restrisiko, dass die verwendeten Mikroorganismen wieder aktiv werden und somit die Krankheit auslösen, die sie eigentlich verhindern sollten. Aus diesem Grund greifen Wissenschaftler bei der Entwicklung neuer Impfstoffe heutzutage lieber auf einzelne Untereinheiten der Krankheitserreger zurück. Die so genannten Subunit-Vakzine enthalten bestimmte Proteine der Erreger, aber keine Erbsubstanz. Ihr Vorteil liegt auf der Hand: Sie können selbst keine Infektion hervorrufen. Allerdings sind diese Impfstoffe teuer, unter anderem deshalb, weil ihre biotechnische Herstellung in Kulturen von Bakterien oder tierischen Zellen einen aufwendigen Reinigungsschritt beinhaltet. Außerdem können sie wieder nur gekühlt aufbewahrt sowie transportiert werden.

JOHNSON & FANCHER

Künftiger Ersatz für die Spritze: Bananen, Kartoffeln und Tomaten, aber auch Salat, Reis, Weizen, Sojabohnen und Mais kommen als Produzenten für essbare Impfstoffe in Frage.

Essbare Impfstoffe sind dem Prinzip der Subunit-Vakzine nachempfunden. Auch sie enthalten nur ausgewählte Antigene. Eine unkontrollierte Vermehrung – und somit ein Ausbruch der Krankheit infolge des Impfstoffes – kann aus diesem Grund ausgeschlossen werden.

Bereits vor zehn Jahren war Arntzen und anderen Forschern klar, dass essbare Impfstoffe deshalb genauso sicher wie Subunit-Vakzine wären, aber wesentlich kostengünstiger und robuster. Doch vor einem Einsatz am Menschen mussten erst einmal etliche Fragen geklärt werden. Würden die gentechnisch veränderten Pflanzen überhaupt funktionstüchtige Antigen-Proteine produzieren? Würden die Magensäfte von Versuchstieren diese Eiweißstoffe vorzeitig zerstören? (Subunit-Vakzine müssen normalerweise injiziert werden, weil Verdauungsenzyme sie sonst abbauen.) Selbst wenn „überlebende" Antigene das Immunsystem wirklich alarmieren – würde die ausgelöste Immunreaktion auch stark genug sein, um die Tiere vor einer Infektion zu schützen?

Außerdem wollten die Forscher wissen, ob essbare Impfstoffe eine Immunität der Schleimhaut hervorrufen können. Da viele Krankheitskeime über Nase, Mund oder andere Körperöffnungen eindringen, liegen die vordersten Verteidigungslinien in den Schleimhäuten, welche die Atemwege, Verdauungs- und Harnwege sowie den Genitaltrakt auskleiden. Ist die Immunantwort dieser ersten Barriere effektiv, werden dort so genannte sekretorische Antikörper freigesetzt, die den Eindringling umhüllen und dadurch unschädlich machen können. Eine wirkungsvolle Lokalreaktion aktiviert außerdem Abwehr- ▶

zellen, die das Blut- und Lymphsystem durchwandern. So kommt eine den ganzen Körper umfassende „systemische" Immunantwort zustande, auch fern des ursprünglichen Geschehens.

Injizierte Impfstoffe umgehen primär die Schleimhäute und verstehen sich deshalb gewöhnlich nicht besonders gut auf die Stimulation der dortigen Immunreaktion. Essbare Impfstoffe hingegen kommen zwangsläufig mit der Schleimhaut des Verdauungssystems in Berührung. Sie sollten deshalb – zumindest theoretisch – beide Formen der Immunität hervorrufen. Dieser doppelte Effekt wiederum verspricht besseren Schutz vor vielen gefährlichen Mikroorganismen – einschließlich dem Erreger für schweren Durchfall.

Bei der Entwicklung essbarer Impfstoffe steht gerade der Schutz vor Durchfallerkrankungen an vorderer Stelle. Deren wichtigste Verursacher sind das Rotavirus, das Norwalk-Virus, der Cholera-Erreger (das Bakterium *Vibrio cholerae*) und bestimmte Stämme des Darmbakteriums *Escherichia coli*. Insgesamt kosten sie jedes Jahr mehr als drei Millionen Kindern das Leben, vor allem in der Dritten Welt. Sie alle schädigen die Schleimhaut des Dünndarms, sodass Wasser aus dem Blut und den Geweben in den Hohlraum des Darms übertritt. Den rapiden Wasser- und Salzverlust kann man zwar mit elektrolythaltigen Infusionen oder Trinklösungen begegnen. Stehen solche Möglichkeiten zur Rehydrierung jedoch nicht zur Verfügung, verlaufen die Durchfallerkrankungen oft tödlich. Und bis jetzt gibt es keine Impfstoffe dagegen, deren breiter Einsatz in Ländern mit schlechter Infrastruktur praktikabel wäre.

Infos

Lebend-Impfstoffe
enthalten lebende, aber abgeschwächte Viren oder Bakterien, die ihre krankmachende Eigenschaft verloren haben.

Tot-Impfstoffe
enthalten abgetötete Bakterien, inaktivierte Viren, bestimmte Bestandteile der Erreger oder ein entschärftes, ursprünglich krankmachendes Produkt von Bakterien (Beispiel: Tetanus-Toxin).

DNA-Impfstoffe
enthalten Teile der Erbsubstanz eines Erregers. Wenn menschliche Zellen davon etwas aufnehmen, produzieren sie vorübergehend fremde Proteine, die das Immunsystem alarmieren.

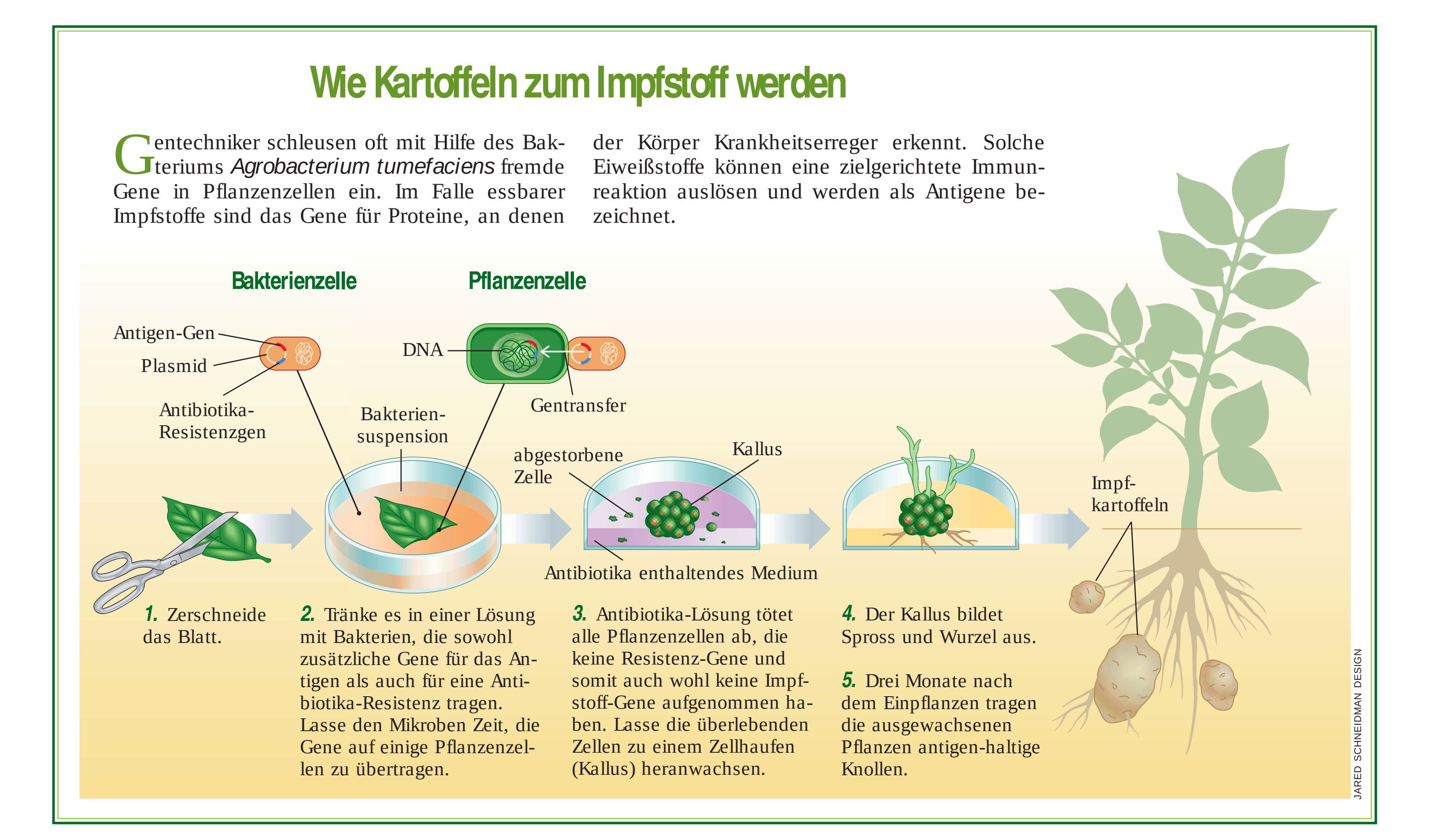
Essbare Impfstoffe
bestehen aus Früchten oder anderen genießbaren Teilen einer Pflanze, die gentechnisch zu einem Produzenten von Erreger-Proteinen umfunktioniert wurde.

Mitte der neunziger Jahre war wenigstens eine der vielen offenen Fragen bei der Entwicklung essbarer Impfstoffe beantwortet: Pflanzen konnten tatsächlich fremde Protein-Antigene in der korrekten räumlichen Gestalt produzieren. Arntzen und seine Kollegen hatten dazu das Gen für ein Protein des Hepatitis-B-Virus in Tabakpflanzen eingeführt (der Erreger verursacht Leberentzündungen und fördert Leberkrebs). Injizierten sie Mäusen das hergestellte Protein-Antigen, löste es die gleichen Immunreaktionen aus wie das Virus selbst.

Aber nicht Injektionen, sondern Impfungen durch Nahrungsaufnahme sind das Ziel. Auf den Etappen dorthin waren in den letzten fünf Jahren zahlreiche Fortschritte zu verzeichnen, so von meinem Team an der Universität Loma Linda (Kalifornien) und dem von Arntzen, mittlerweile am Boyce-Thomson-Institut für Pflanzenforschung an der Cornell-Universität in Ithaca (US-Bundesstaat New York). Beide Gruppen wiesen mit unterschiedlichen genmanipulierten Kartoffel- oder Tomatenpflanzen nach, dass die verfütterten Knollen oder Früchte sowohl eine „mukosale" – in den Schleimhäuten – als auch eine systemische Immunantwort auslösen können. Sie schützten vollständig oder zumindest teilweise vor dem Hepatitis-B-Virus, dem Norwalk-Virus sowie den bakteriellen Giftstoffen von *E.*

Wie Kartoffeln zum Impfstoff werden

Gentechniker schleusen oft mit Hilfe des Bakteriums *Agrobacterium tumefaciens* fremde Gene in Pflanzenzellen ein. Im Falle essbarer Impfstoffe sind das Gene für Proteine, an denen der Körper Krankheitserreger erkennt. Solche Eiweißstoffe können eine zielgerichtete Immunreaktion auslösen und werden als Antigene bezeichnet.



1. Zerschneide das Blatt.

2. Tränke es in einer Lösung mit Bakterien, die sowohl zusätzliche Gene für das Antigen als auch für eine Antibiotika-Resistenz tragen. Lasse den Mikroben Zeit, die Gene auf einige Pflanzenzellen zu übertragen.

3. Antibiotika-Lösung tötet alle Pflanzenzellen ab, die keine Resistenz-Gene und somit auch wohl keine Impfstoff-Gene aufgenommen haben. Lasse die überlebenden Zellen zu einem Zellhaufen (Kallus) heranwachsen.

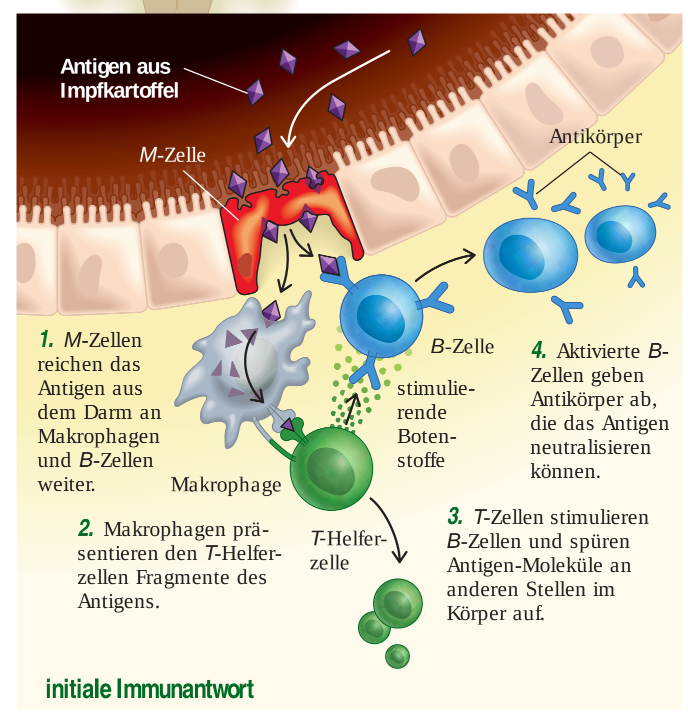
4. Der Kallus bildet Spross und Wurzel aus.

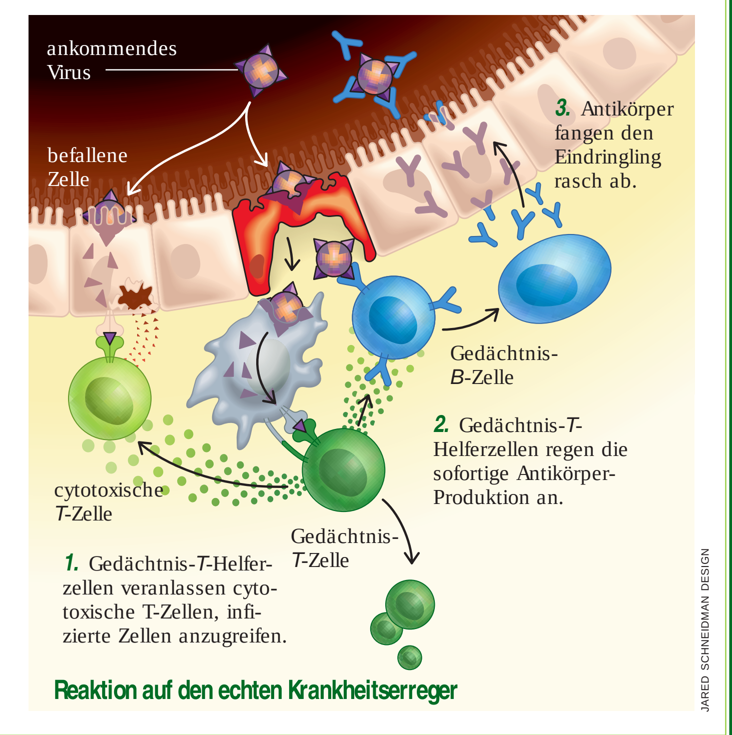
5. Drei Monate nach dem Einpflanzen tragen die ausgewachsenen Pflanzen antigen-haltige Knollen.

Impf-
kartoffel

Wie essbare Impfstoffe schützen

So genannte *M*-Zellen der Dünndarmwand nehmen das Antigen-Protein aus einem essbaren Impfstoff auf (unten links) und reichen es an verschiedene andere Immunzellen weiter. Diese starten daraufhin Abwehrreaktionen – so als ob das Antigen der echte Erreger wäre und nicht nur ein harmloser Teil von ihm. Es bleiben langlebige Gedächtniszellen zurück, die den Krankheitserreger rasch neutralisieren, sobald er versucht, in den Körper einzudringen (rechts).





coli und *Vibrio cholerae*. Auch gegen das Tollwutvirus beispielsweise und gegen das Bakterium *Heliobacter pylori* (es verursacht Magen-Schleimhaut-Entzündungen und fördert Magenkrebs) haben Forscher essbare Impfstoffe entwickelt, die Labortieren einen gewissen Schutz bieten.

Pflanzenzellen bringen einen großen Vorteil mit: Durch eine zusätzliche stabile Zellwand um ihre Außenmembran sind sie sehr viel widerstandsfähiger als tierische Zellen. So haben die Antigene bessere Chancen, die zersetzende Magenpassage zu überstehen. „Bröckelt“ die Zellwand schließlich im Darm, setzen die Pflanzenzellen langsam ihre Antigen-Fracht frei.

Doch was in Tiermodellen funktioniert, muss für den Menschen nicht gelten. Die klinische Erprobung steht hier erst am Anfang. An der ersten veröffentlichten Studie vor vier Jahren beteiligten sich rund ein Dutzend Probanden. Sie bekamen von Arntzens Team rohe, geschälte Kartoffeln zu essen – ausgestattet mit einem ungefährlichen Abschnitt des Toxins von *E. coli*. Das Ergebnis: sowohl eine spezifische Immunreaktion der Schleimhäute wie auch eine systemische Aktivierung der Abwehr. Eine spätere Studie des Teams mit einem Rohkartoffel-Vakzin gegen das Norwalk-Virus löste bei 19 von 20 Probanden Immunreaktionen aus. Auch Salat eignet sich als „Transportmittel“ für Impfstoffe, wie ein erster Test von Hillary Koprowski an der Thomas-Jefferson-Universität in Philadelphia zeigte. Hierbei entwickelten zwei der drei Freiwilligen nach Verzehr eine gut ausgeprägte systemische Abwehr gegen das Hepatitis-B-Virus. Doch ob essbare Impfstoffe den Menschen im Ernstfall ausreichend schützen, muss noch erforscht werden.

Literaturhinweise

Pflanzenbiotechnologie – Neuartige Lebensmittel (Novel Food) und Pharmazeutika. Von E. Schell-Frederick und J. S. Schell in: Deutsches Ärzteblatt 97: Heft 28/29, S. 1666, 2000.

Plant-Based Vaccines for Protection against Infectious and Autoimmune Diseases. Von J. E. Carter und W. H. R. Langridge in: Critical Reviews in Plant Sciences (im Druck).

Weitere Hinweise finden Sie unter ***www.spektrum.de/aktuelles heft.html***

Die bisher abgeschlossenen Studien zeigen zwar, dass essbare Impfstoffe im Prinzip machbar sind. Doch bleiben noch viele Probleme zu lösen. Zum Beispiel produzieren Pflanzen nur geringe Mengen fremder Antigene. Allerdings lässt sich die Ausbeute steigern, etwa indem man das Antigen-Gen mit einem genetischen Steuerelement der Pflanze verknüpft, das die Produktion ankurbelt. Als Nächstes ist sicherzustellen, dass jede Pflanze auch ungefähr dieselbe Konzentration des Impfstoffes enthält. Große Schwankungen dürfen nicht auftreten.

Ferner lohnt ein Versuch, die geringen Konzentrationen an Antigen im Körper besser auszunutzen. Allgemein immunstimulierende Hilfsstoffe (Adjuvantien) sowie ein „zielsicheres“ Design der Antigene könnten einen unzureichenden Gehalt der Pflanzen teilweise kompensieren. Eine mögliche Strategie, um die Antigene an die richtige Stelle zu lenken: Man koppele sie an spezifische Moleküle, die sich gut an spezialisierte Immunzellen der Darmschleimhaut heften. Diese als *M*-Zellen bezeichneten Komponen- ▶

ten der Abwehr fungieren als Kontrolleure. Stichprobenartig nehmen sie Material aus dem Darminhalt auf – auch eventuell vorkommende Krankheitskeime – und geben es an spezielle andere Zellen des Immunsystems weiter. Zu den Empfängern gehören Makrophagen (große Fresszellen) und dendritische Zellen. Diese zerlegen die aufgenommenen Proteine und bieten einzelne Fragmente auf einer Art molekularem Präsentierteller anderen Abwehrzellen dar. Erkennen nun so genannte *T*-Helferzellen aus der Gruppe der Lymphocyten die Bruchstücke als fremd, unterstützen sie andere Truppen, wie die *B*-Lymphocyten. Diese wiederum produzieren und entlassen passende Antikörper, die mit den Antigenen einen Komplex eingehen und sie neutralisieren. *T*-Zellen helfen zudem, breiter angelegte Attacken gegen den entdeckten Eindringling in Gang zu bringen.

Als künstlicher Lenkkopf bietet sich nun ein für den Menschen ungefährliches Teilstück des Cholera-Toxins an: Diese B-Untereinheit heftet sich besonders gut an ein bestimmtes Oberflächenmolekül der Kontrolleurszellen. Indem man ihr Antigene anderer Krankheitserreger ankoppelt, sollte sich die Aufnahme in die *M*-Zellen und somit die Reaktion des Immunsystems steigern lassen. Die B-Untereinheiten vereinigen sich gewöhnlich zu fünft zu einem Ring. Diese Eigenart wäre bei der Entwicklung eines Kombi-Impfstoffes nützlich, um gleichzeitig verschiedene Antigene an die *M*-Zellen heranzuführen. Der Traum von einem einzigen Impfstoff, der gleichzeitig gegen die wichtigsten Infektionskrankheiten immun macht, könnte somit wahr werden.

Eine weitere noch zu überwindende Hürde hat mit der Überlastung der genmanipulierten Pflanzen zu tun: Wenn sie generell große Mengen eines fremden Proteins produzieren, wachsen sie oftmals nur dürftig. Ein Ausweg: Man stattet das Gen mit „automatischen" Steuerelementen aus, die beispielsweise nur in essbaren Teilen der Pflanze die Produktion freigeben oder erst ab einem bestimmten Wachstumsstadium. Denkbar ist auch ein „bedienbarer" Schalter, über den man die Synthese durch eine von außen zugeführte Aktivatorsubstanz zu jedem beliebigen Zeitpunkt anwerfen kann. Auch hier kommen die Forscher voran.

Impfstoffe gegen Diabetes?

Doch jede Pflanzenart fordert den Einfallsreichtum der Genetiker auf eigene Weise. Kartoffeln sind zum Beispiel in vieler Hinsicht ideal: Sie lassen sich einfach vermehren und außerdem über längere Zeit ungekühlt lagern, ohne dass ihre Qualität groß darunter leidet. Das Problem der Erdäpfel liegt allerdings in ihrer Zubereitung. Ihr roher Genuss ist nicht unbedingt ein Gaumenschmaus und meist nicht sonderlich bekömmlich. Beim Kochen jedoch verlieren Protein-Moleküle meist ihre natürliche, dreidimensional gefaltete Gestalt – sie denaturieren und taugen dann nicht mehr als Antigen.

Kartoffeln waren eigentlich nie als künftige Produktionsstätte der Impfstoffe gedacht, eigneten sich aber – wie Tabakpflanzen – wegen ihrer einfachen Manipulierbarkeit gut für Vorversuche. Wie sich aber zeigte, teilen nicht alle Menschen die Abneigung gegen rohe Kartoffeln; in Südamerika kommen einige Sorten durchaus ungekocht auf den Tisch. Auch zerfallen, entgegen der Erwartung,

Gentechnik gegen Mangelernährung

Parallel zur Forschung an essbaren Impfstoffen laufen auch Bemühungen, Grundnahrungsmittel mit Nährstoffen und Vitaminen anzureichern. Ein viel zitiertes Beispiel ist der „Goldene Reis", der die Bevölkerung in großen Teilen Asiens, Afrikas und Lateinamerikas vor Vitamin-A-Mangel schützen soll. Die Unterversorgung mit diesem Vitamin kann zu Erblindung und einem geschwächten Immunsystem führen – Todesursache für über eine Million Kinder jedes Jahr.

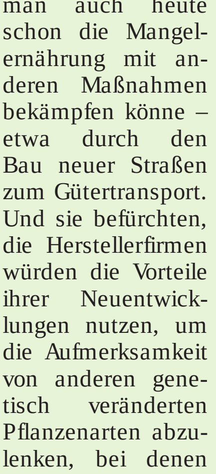
Da Reis für mehr als ein Drittel der Weltbevölkerung die Ernährungsgrundlage darstellt, eignet er sich besonders gut als „Vitaminspritze". Aber natürlich vorkommende Reissorten enthalten kein Vitamin A. „Goldener Reis" hingegen ist gentechnisch so manipuliert, dass er Beta-Carotin produziert – einen natürlichen Farbstoff, den der Körper in Vitamin A umwandelt.

Bis jetzt ist dieser „Goldene Reis" noch nicht im Handel. Zuvor muss noch vieles geklärt werden, unter anderem die Frage, ob der menschliche Körper das Beta-Carotin aus dem Reis überhaupt effizient genug aufnimmt. Die Testphase wird mindestens bis 2003 dauern.

Inzwischen versuchen die Forscher, den Beta-Carotin-Gehalt im Reis weiter zu erhöhen und ihn mit zusätzlichen Vitaminen und Mineralstoffen anzureichern. 1999 ist es bereits gelungen, den Eisen-Gehalt von Reiskörnern zu steigern. Weltweit leiden mehr als zwei Milliarden Menschen an Eisenmangel.

Verbesserungen werden auch bei anderen Nahrungsmitteln angestrebt. Im Juni 2000 etwa berichtete eine Gruppe japanischer und britischer Wissenschaftler über die Kreation einer transgenen Tomate, deren Gehalt an Beta-Carotin die üblichen Werte um das Dreifache übersteigt. Daneben werden konventionelle Zuchtmethoden angewandt, wie bei einem internationalen Projekt zur Erhöhung des Vitamin- und Mineralstoffgehaltes von Reis und vier anderen Grundnahrungsmitteln: Weizen, Mais, Bohnen und Maniok.

Doch nicht jedermann ist von den Erfolgen der Pflanzengenetik begeistert. Genetisch veränderte Lebensmittel sind weiterhin umstritten. Einige Gegner argumentieren, dass man auch heute schon die Mangelernährung mit anderen Maßnahmen bekämpfen könne – etwa durch den Bau neuer Straßen zum Gütertransport. Und sie befürchten, die Herstellerfirmen würden die Vorteile ihrer Neuentwicklungen nutzen, um die Aufmerksamkeit von anderen genetisch veränderten Pflanzenarten abzulenken, bei denen der Nutzen für den Konsumenten weniger deutlich auf der Hand liegt (wie zum Beispiel bei künstlich pestizid-resistenten Pflanzen). Ganz oben unter den Bedenken rangieren Umweltrisiken und mögliche Gefahren für den Verbraucher. Die Befürworter von optimierten Nahrungsmitteln hoffen jedoch, dass der Reis nicht mit dem Kochwasser ausgeschüttet wird.

PETER BEYER, UNIVERSITÄT FREIBURG

Beta-Carotin verleiht dem „Goldenen Reis" seine Farbe und macht ihn wertvoller für die Ernährung.

Ricki Rusting
Die Autorin ist Redaktionsmitglied bei Scientific American.

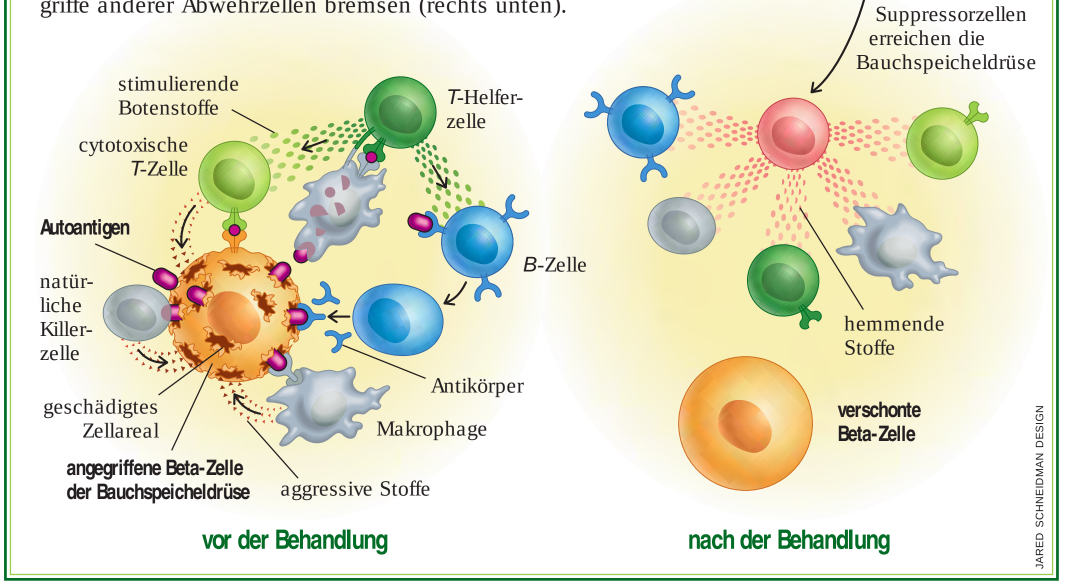
nicht alle Antigene beim Erhitzen. Daher sind Kartoffeln als Vakzin-Vehikel vielleicht doch brauchbarer als die meisten Forscher zunächst gedacht hatten.

Bananen wiederum stellen die Pflanzengenetiker vor andere Probleme. Zwar muss man sie nicht kochen, und die Pflanzen gedeihen verbreitet in der Dritten Welt, aber sie brauchen einige Jahre, bis sie herangewachsen sind. Außerdem verderben ihre Früchte rasch nach der Ernte. Das gilt auch für die weit verbreiteten Tomaten; sie wachsen dafür aber schneller. Abhilfe könnten preiswerte Konservierungsmethoden wie das Trocknen der Früchte schaffen.

Als weitere essbare Impfstoff-Produzenten erwägen Forscher auch Salat, Karotten, Erdnüsse, Reis, Weizen, Mais und Sojabohnen. Sicherzustellen ist allerdings, dass der Schuss nicht nach hinten losgeht. Bei dem Phänomen der „oralen Toleranz“ etwa mindert gerade die Aufnahme bestimmter Proteine mit der Nahrung letztlich eine Reaktion gegen diese Antigene. Damit dies nicht bei einem essbaren Impfstoff passiert, bedarf es erst noch genauerer Kenntnis, wie sich die Reaktion in die gewünschte Richtung lenken lässt. Dosierung und Einnahmeschema müssen jedenfalls eine sichere, wirksame Anwendung gewährleisten.

Angriffe auf das Selbst abwenden

Typ-I-Diabetes entsteht, wenn das Immunsystem fälschlich bestimmte Proteine der Insulin produzierenden Beta-Zellen in der Bauchspeicheldrüse für fremde Antigene hält. Die nachfolgende Autoimmunreaktion gegen die vermeintlich schädlichen „Selbst-Antigene“ zerstört die Beta-Zellen (links unten). Dieser Prozess wird bei diabetischen Mäusen gebremst, wenn sie geringe Mengen der auslösenden Proteine mit dem Futter zu sich nehmen. Warum, ist aber unklar. Die zugeführten Autoantigene könnten Suppressorzellen des Immunsystems stimulieren (Ausschnitt oben), die dann die Angriffe anderer Abwehrzellen bremsen (rechts unten).



Das Risiko der oralen Toleranz inspirierte mich und andere Forscher, diese eigentlich unerwünschte Wirkung essbarer Impfstoffe in eine nützliche umzumünzen: zum Eindämmen von Auto-Immunerkrankungen. Beim Diabetes vom Typ I beispielsweise zerstört der Körper die Beta-Zellen der Bauchspeicheldrüse, die eigentlich Insulin produzieren sollen. Fehlt das Hormon, bleibt Zucker im Blut, statt „hungrige“ Zellen zu speisen. Diabetiker sind zeitlebens auf Insulin angewiesen und durch eine Reihe schwerwiegender Folgeschäden gefährdet.

In den letzten 15 Jahren haben Wissenschaftler in den Beta-Zellen mehrere Proteine identifiziert, die bei entsprechend veranlagten Personen Autoimmun-Attacken auslösen können. Hierzu gehört vor allem das Insulin selbst und das Enzym Glutamat-Decarboxylase. Auch bei der Früherkennung eines sich „zusammenbrauenden“ Diabetes haben die Forscher Fortschritte gemacht. Nun gilt es herauszufinden, wie sich der schleichende Prozess aufhalten lässt, bevor Symptome entstehen. Daher haben meine Kollegen und andere Teams Diabetes-Impfstoffe auf Pflanzenbasis entwickelt: etwa Kartoffeln, die Insulin oder Glutamat-Decarboxylase enthalten – wiederum gekoppelt an die ungefährliche Untereinheit des Cholera-Toxins. Im Tiermodell zeigten sich erste Erfolge. Verfüttert man nämlich die Kartoffeln an einen Mäusestamm mit einer Veranlagung zu Diabetes, so wurde die selbstzerstörerische Immunreaktion unterdrückt; erhöhte Blutzuckerspiegel traten gar nicht oder erst verzögert auf.

Noch produzieren Pflanzen zu wenig solcher „Selbst-Antigene“, als dass sie bei Menschen ausreichenden Schutz vor Diabetes oder anderen Auto-Immunerkrankungen gewährleisten könnten. Doch genauso wie im Falle von Infektionskrankheiten prüft man auch hier jetzt verschiedene Erfolg versprechende Lösungswege, für diese und weitere Probleme.

Die Entwicklung essbarer Impfstoffe hat freilich nicht nur wissenschaftliche Hemmnisse zu überwinden. Nur wenige Pharmaunternehmen wollen in Produkte investieren, die primär für Märkte außerhalb der lukrativen Industrieländer gedacht sind. Internationale Hilfsorganisationen, private Spender und die Regierungen einiger Länder versuchen die Finanzierungslücke zu schließen, doch alles in allem wird die Entwicklung essbarer Impfstoffe unzureichend gefördert. Leider färbt auch noch der Makel, der gentechnisch veränderten Lebensmitteln anhaftet, auf diesen medizinischen Bereich ab.

Ich persönlich hoffe jedoch, dass essbare Impfstoffe nicht zum Gegenstand ernster Kontroversen werden, da sie der Rettung von Menschenleben dienen und wohl auf viel weniger Fläche als andere gentechnisch veränderte Pflanzen angebaut würden – wenn man sie überhaupt außerhalb von Gewächshäusern kultiviert. Als Pharmazeutika wären sie zudem viel strengeren Kontrollen unterworfen als genetisch manipulierte Pflanzen. ■

William H. R. Langridge *ist einer der führenden Köpfe in der Entwicklung von essbaren Vakzinen gegen Infektions- und Autoimmunerkrankungen. Er lehrt als Professor am Center for Molecular Biology and Gene Therapy an der Universität Loma Linda (Kalifornien). Nach seiner Promotion in Biochemie 1973 an der Universität von Massachusetts in Amherst forschte er an verschiedenen Institutionen, ehe er 1993 an seine heutige Wirkstätte wechselte.*

Killer-Seen

Zwei Seen in Kamerun setzten in den achtziger Jahren tödliche Gaswolken frei, denen mehr als 1700 Menschen und ungezählte Tiere zum Opfer fielen. Da sie jederzeit wieder ausbrechen könnten, versuchen Wissenschaftler nun im Wettlauf mit der Zeit eine weitere Tragödie zu verhindern.

VON MARGUERITE HOLLOWAY

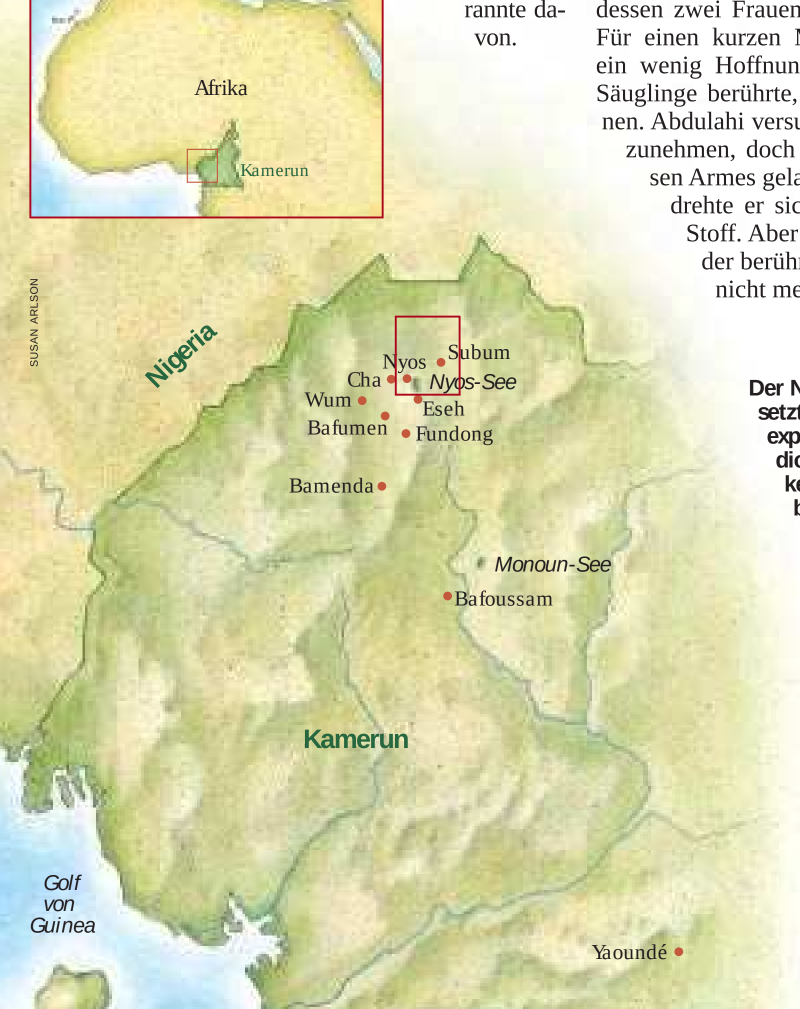
Als Mohammed Musa Abdulahi am Samstagmorgen aufwachte, konnte er seinen rechten Arm weder spüren noch bewegen. Er hatte sich nicht wohl gefühlt, erinnerte er sich, und war ins Schulgebäude gegangen, um sich hinzulegen, anstatt sich um die jüngeren Schüler zu kümmern, wie er das sonst manchmal tat. Wie lange das her war, wusste er nicht. Mit seinem schlaff herabhängenden Arm erhob er sich mühsam und stieß mit der Fußspitze einen Freund an, der ebenfalls hereingekommen war, um sich etwas auszuruhen. Dieser fuhr hoch, schrie aus nicht erkennbarem Grund auf und rannte davon.

Beunruhigt eilte Abdulahi aus dem Schulgebäude. Draußen umfing ihn eine unheimliche Stille. Noch schrecklicher war der Anblick, der sich ihm nach wenigen Schritten bot: Die Straßen und Plätze seines Heimatdorfes Subum im Nordwesten Kameruns waren mit Leichen übersät. Menschen lagen reglos auf dem Boden, als ob sie beim Spaziergang oder mitten im Gespräch urplötzlich umgekippt wären. Die Hunde waren tot. Das Vieh war tot. Vögel und Insekten waren von den Bäumen gefallen.

Abdulahi hastete zu seinem Elternhaus – nur um festzustellen, dass seine gesamte Familie ausgelöscht war: Seine Brüder und Schwestern, sein Vater und dessen zwei Frauen waren allesamt tot. Für einen kurzen Moment schöpfte er ein wenig Hoffnung. Als er einen der Säuglinge berührte, begann der zu weinen. Abdulahi versuchte das Kind hochzunehmen, doch wegen seines leblosen Armes gelang ihm das nicht. So drehte er sich eine Schlinge aus Stoff. Aber als er das Baby wieder berührte, lebte es ebenfalls nicht mehr.

„Es ist furchtbar, ohne Familie zu sein", sagt er heute. „Was du auch tust, du fühlst dich nicht ganz richtig." Abdulahi erzählt mir seine Geschichte, während wir am Südufer des Nyos-Sees sitzen. Es ist derselbe See, der am Donnerstag, dem 21. August 1986, gegen Abend eine erstickende Gaswolke ausspie, die alle elf Mitglieder von Abdulahis Familie sowie mindestens 1700 weitere Menschen tötete. Und er könnte jederzeit wieder explodieren. Abdulahi ist zum ersten Mal nach dem schrecklichen Geschehen zurückgekehrt, bei dem er zwei Tage im Koma gelegen hatte, was ihn aus irgendeinem Grund rettete. Heute ist er ein hoch gewachsener junger Mann von 29 Jahren. „Es ist nicht so, dass ich beschlossen hatte, nicht zurückzukehren", sagt er in seiner ruhigen Art. „Doch jetzt ist es einfach Schicksal."

In der Tat sind es seltsame Umstände, die Abdulahi mit jenem internationalen Forscherteam zusammengebracht haben, das nach Kamerun gekommen ist, um die tickende Zeitbombe zu entschärfen, die der See noch immer darstellt. An diesem Nachmittag ist Abdulahi zu Fuß von



SUSAN ARLSON

Der Nyos-See in Kamerun setzte im August 1986 explosionsartig Kohlendioxid frei. Die Gaswolke wälzte sich durch benachbarte Flusstäler und erstickte im Umkreis bis 20 Kilometer etwa 1700 Menschen und ihr Vieh.



KLAUS TIETZE, CELLE / THOMAS BRAUN

FOTO: KLAUS TIETZE, CELLE, GRAFIK: THOMAS BRAUN / KLAUS TIETZE, CELLE

Der Nyos-See – oben wenige Wochen nach dem Ausbruch 1986 – liegt im Krater über dem Schlot eines erloschenen Vulkans, aus dem immer noch Kohlendioxid austritt. Das Gas sammelt sich in den Tiefen des Sees und wird plötzlich freigesetzt, wenn ein äußeres Ereignis die Schichtung des Wassers stört.

der Stadt Eseh zum See hinunter gegangen. Mit seinem gelbbraunen Mantel, der schwarzen Hose und dem schwarz-weiß karierten Hemd ist er eine adrette Erscheinung in dem Chaos, das am Ufer herrscht: Messgeräte, Zubehör für den Bau von Flößen, Schlauchboote, Zelte, Kühlgeräte, räudige Hunde, Hühner, die bald im Kochtopf landen werden, und hektische, ungewaschene Wissenschaftler sowie eine ungepflegte Journalistin – umringt von einigen Dutzend Neugierigen aus der Umgebung. Einen Tag zuvor hatte ein Fahrer, der unterwegs war, um das Team am Nyos-See zu treffen, in der Stadt Bamenda nach dem Weg gefragt und Abdulahi als Führer aufgegabelt. Und so fand sich der Überlebende der einstigen Katastrophe nur eine Woche, nachdem er einen Fernsehbericht über die Ankunft des Teams in der Hauptstadt Yaoundé gesehen und sich gefragt hatte, wie er dazustoßen könnte, als Projektteilnehmer zeltend am Ufer des Nyos-Sees wieder.


Fulani-Hirte mit verendeten Schafen

PETER TURNLEY, CORBIS

Für die Mitglieder des Teams markierte die Ankunft in Yaoundé im Oktober 1999 einen neuen Anlauf in dem seit 1986 andauernden Bemühen, den Nyos-See von dem gefährlichen Gas zu befreien, das sich an seinem Grund ansammelt, bevor er vielleicht wieder explodiert und weitere zigtausend Menschen tötet. An sich ist eine solche Entgasung technisch unkompliziert und als vorbeugende Maßnahme gegen eine Naturkatastrophe relativ simpel und preiswert. Doch sie tatsächlich durchzuführen hat sich als erstaunlich schwierig erwiesen. Trotz der offensichtlichen Dringlichkeit des Problems und der einzigartigen Gelegenheit, eine Naturkatastrophe zu verhindern, wurde in all den Jahren so gut wie nichts getan, um die Menschen am Nyos-See zu schützen.

Schuld daran trugen unter anderem die Politik, mangelnde finanzielle Unterstützung (wegen der eher reaktiven als präventiven Ausrichtung einiger Hilfsorgani- ▶

sationen) sowie Kommunikationsprobleme. Obwohl einige dieser Schwierigkeiten immer noch nicht ausgeräumt waren und beunruhigend im Hintergrund dräuten, schien es in Yaoundé doch so, als wenn endlich etwas passieren würde.

Der Nyos-See liegt idyllisch inmitten von Ackerland, grünen Hügeln und steil aufragenden Felsformationen. An dem Nachmittag, als Abdulahi eintrifft, wirkt er grau und ist spiegelglatt, als könne er kein Wässerchen trüben; doch in der Tiefe herrscht geisterhafte Aktivität. Vor etwa 500 Jahren schuf ein Vulkanausbruch hier einen Krater, an dessen Boden ein Magmapfropfen zurückblieb. Der Pfropfen kühlte ab, und die Senke darüber füllte sich 210 Meter hoch mit Wasser. Weltweit sind in Vulkangebieten zahlreiche Kraterseen zu finden – doch gibt es anscheinend nur zwei, die jemals explodiert sind und Menschenleben gefordert haben. Bei dem anderen handelt es sich um den nur 95 Kilometer südöstlich gelegenen Monoun-See.



MARGUERITE HOLLOWAY

Maisfelder am Rande des Nyos-Sees

Kohlendioxid (CO_2), das vulkanischer Aktivität in großen Tiefen entstammt, steigt hoch, bis es auf Grundwasser unter dem Krater trifft. Es löst sich darin und gelangt mit ihm und den enthaltenen Mineralen in den Nyos-See, wo es sich in den bodennahen Wasserschichten anreichert. Die meisten Kraterseen werden von Zeit zu Zeit umgewälzt, wobei die tieferen Schichten an die Oberfläche gelangen. Dort kann das enthaltene Gas in die Atmosphäre entweichen, ohne Schaden anzurichten. Doch der Nyos- und der Monoun-See wälzen sich nicht um. Die Grenze zwischen mineralreichem Tiefenwasser hoher Dichte und frischem Oberflächenwasser geringer Dichte, Chemokline genannt, ist bedenklich stabil.



MARGUERITE HOLLOWAY

Expeditionsleiter George W. Kling

Eine tickende Zeitbombe

In den beiden Seen in Kamerun bleibt das Kohlendioxid also in der Tiefe gefangen. Es reichert sich dort so lange an, bis irgendein Faktor – kräftige Winde oder Sturmböen, die interne Wellen in der Schichtung anregen, kühlere Witterung, die Teile des Oberflächenwassers absinken lässt, oder ein Erdrutsch oder Erdbeben – einen Teil des Tiefenwassers dazu bringt aufzusteigen. Das Kohlendioxid, das nun nicht mehr durch den hydrostatischen Druck in Lösung gehalten wird, perlt wie beim Öffnen einer Mineralwasserflasche aus; es steigt in Blasen auf und reißt dabei noch mehr Tiefenwasser mit. Man nimmt an, dass dieser Prozess sich durch resonanzartige Schwingungen aufschaukelt. Aus einigen Gasbläschen entsteht ein gewaltiges Schäumen und Brausen. Schließlich explodiert das stark gashaltige Wasser wie Sekt, der nach kräftigem Schütteln entkorkt wird. Eine gewaltige Wasserfontäne erhebt sich, die am Nyos-See 80 Meter Höhe erreichte. Das Kohlendioxid entweicht als unsichtbare Gaswolke. Da es anderthalbmal so viel wiegt wie Luft, sammelt es sich am Boden, „fließt“ zu tiefer gelegenen Stellen und erstickt alles Leben unter sich.

Dieses hier vereinfacht dargestellte Modell des Gasausbruchs stammt von dem Physiker Klaus Tietze aus Celle. Er stellte es – ebenso wie einen ersten Entgasungsplan – 1987 auf der Unesco-Konferenz vor, die nach der Nyos-Katastrophe in Yaoundé stattfand, und nannte es „Limnisches Fontänen-Eruptionsmodell“. Tietze bestimmte auch als Erster die Gassättigung des Nyos-Sees in Abhängigkeit von der Tiefe. Wie er herausfand, verläuft die Sättigungskurve nicht gleichmäßig, sondern weist im Bereich der Chemokline deutliche Spitzen auf. Wenn nun die Gassättigung im Bereich der Spitzen schon nahe an 100 Prozent heranreicht, genügt bereits eine interne Welle oder eine andere geringe Störung, um die Spitzen so weit anzuheben, dass das Wasser in diesem Bereich kurzzeitig übersättigt wird. Das erklärt, wie es in einem größtenteils untersättigten See dennoch zu einem Gasausbruch kommen kann.

Bei der Explosion des Monoun-Sees am 15. August 1984 wurden 37 Menschen getötet. Der Ausbruch des größeren und tieferen Nyos-Sees hatte noch verheerendere Folgen. Die Gaswolke wälzte sich mit geschätzten 72 Kilometern pro Stunde die Hügel hinab und überrollte Täler und Dörfer bis in 20 Kilometer Entfernung. Nach Ansicht des Biologen George W. Kling von der Universität von Michigan in Ann Arbor, der beide Seen eingehend untersucht hat und das Team leitet, zu dem Abdulahi gestoßen ist, war das letzte Opfer ein Mädchen, das am Morgen nach der Explosion in eine Schlucht hinabstieg, in der sich das schwere Gas in Bodennähe gesammelt hatte. Abdulahi glaubt, er und sein Freund seien verschont geblieben, weil sie in dem Raum trotz der offenen Tür vor der vollen Wirkung des Gases geschützt waren. Während der zwei Tage im Koma lag er die ganze Zeit auf seinem rechten Arm. Der wurde dadurch so lange mangelhaft durchblutet, dass er

mehrere Monate nicht benutzbar war. Abdulahi glaubt, das Gas hätte den Verstand seines Freundes getrübt; das passt zu Berichten über Orientierungsschwierigkeiten bei vielen Überlebenden.

Der Nyos-See ist offensichtlich eine Zeitbombe. Nach neuesten Berechnungen von Kling und dem Chemiker William C. Evans vom Geologischen Dienst der USA enthält er mit 0,4 Kubikkilometern Kohlendioxid bereits wieder mehr als doppelt so viel von dem gefährlichen Gas wie die 0,17 Kubikkilometer, die während der Explosion 1986 freigesetzt wurden. Bei einem erneuten Ausbruch könnte auch der brüchige Damm oder die Überlaufrinne am Nordrand des Sees zerstört werden. Die Flutwelle würde sich vermutlich bis nach Nigeria ergießen und 10000 Menschen ertränken oder obdachlos machen.

Obwohl nach der Katastrophe etwa 3500 Bewohner aus der Umgebung des Sees an relativ sichere Stellen umgesiedelt wurden, hat die Fruchtbarkeit der evakuierten Region inzwischen wieder viele Menschen angezogen. Maisfelder grenzen im Süden an das Ufer. In den Hügeln rund um den See weidet Vieh, beaufsichtigt von Hirten des Fulani-Volkes. Und Anfang der neunziger Jahre setzte das Institut für Zoologische und Tiermedizinische Forschung Kameruns in einem unkontrollierten Experiment Süßwasserbarsche der Gattung Tilapia in dem bis dahin fischlosen See aus. Die Barsche gediehen – mit unbekannten Folgen für das Ökosystem – und boten den Menschen einen weiteren Anreiz, an das Gewässer zu ziehen. Angesichts von Landnot und spärlichen Erwerbsmöglichkeiten haben die verarmten Bewohner des Gebiets kaum eine andere Wahl, als sich den trügerisch harmlos wirkenden Fluten des Nyos-Sees wieder zu nähern.

Zum Glück dürften die enormen Schwierigkeiten, diese reizvolle Gegend zu erreichen, zumindest Außenstehende von der Gefahrenzone fern halten. Andererseits erschwert die abgeschiedene Lage auch alle Bemühungen, das Gewässer zu untersuchen und zu entgasen. Fünf Tage nach unserer Ankunft in Yaoundé setzen wir uns mit vier Fahrzeugen Richtung Nyos-See in Bewegung. Zehn von uns nehmen in zwei mit Fahrern gemieteten Geländewagen Platz: Evans; Kling und seine Assistentin Karen J. Riseng; Minoru Kusakabe von der Universität Okayama und vier seiner Kollegen von verschiedenen Institutionen in Japan; Gregory Tanyileke vom Institut für geologische und Bergbauforschung (IRGM) in Kamerun und ich. Die anderen Team-Mitglieder – Tanyilekes IRGM-Kollegen Hubert Mvogo, Jacob Nwalal, Paul Nia und Justin Nlozoa – steuern zwei mit Ausrüstung beladene Lastwagen.

Unterwegs zum Ende der Welt

Auf der Fahrt nach Bamenda passieren wir Laster, auf deren Ladeflächen Hölzer aus den letzten verbliebenen Urwäldern Kameruns gestapelt sind. Wir kommen vorbei an dem faserigen, weißen Fleisch der Maniokwurzeln und an roten, wie Essig riechenden Kakaobohnen, die am Straßenrand zum Trocknen ausgebreitet liegen. Die erste Nacht verbringen wir in einem Hotel und bunkern Vorräte – einschließlich 36 Rollen rosa Toilettenpapier für 14 Personen –, bevor wir am nächsten Tag auf das Ende der geteerten Piste in Fundong zusteuern. (Später ging uns das Mineralwasser aus, Toilettenpapier haben wir immer noch…)

Die einzige Straße, die von dort nach Norden führt, ist grässlich und sorgt so dafür, dass die Gegend um den Nyos-See weitgehend unzugänglich bleibt. Genau betrachtet, handelt es sich um eine Aneinanderreihung von breiten Schlammlöchern, die an trockenen Tagen eine holprige, staubige Fahrspur miteinander verbindet. Auf 13 Kilometern Strecke holpern, schlittern und schlingern wir und bleiben immer wieder stecken. Bei einem Geländewagen bricht eine der Achsschwingen, die für die Bodenhaftung der Räder beim Durchqueren von Schlaglöchern sorgt.

MARGUERITE HOLLOWAY

Überlebte die Nyos-Katastrophe: Mohammed Abdulahi

Am späten Nachmittag wird klar, dass wir es – zu Klings maßloser Enttäuschung – nur bis zum Dorf Bafumen schaffen. Die Mitglieder des japanischen Teams sind geistesgegenwärtig genug, ein Haus aufzutreiben, in dem sie für die Nacht unterkommen. Alle anderen schlagen ihre Zelte auf dem Friedhof auf, gleich unterhalb des Denkmals für die Opfer der Nyos-Katastrophe. Der Nyos-See ist nur noch etwa 17 Kilometer entfernt, doch er scheint genauso unerreichbar wie Yaoundé. Und im Dorf kursiert das Gerücht, dass die Brücke auf der Straße nach Eseh weggespült wurde.

Am nächsten Morgen brechen wir mit frischer Zuversicht auf. Die Achsschwinge ist wieder zusammengeschweißt, und die abendliche Kühle hatten wir durch warmes Bier aus dem Ort gemildert. Nachdem wir den ersten Platten des Tages repariert haben, erreichen wir die Brücke. Sie wurde nicht weggespült – jedenfalls nicht ganz: Die linke Seite ▶



Denkmal für die Opfer des Nyos-Sees



Brücke zwischen Bafumen und Eseh

MARGUERITE HOLLOWAY


MARGUERITE HOLLOWAY

Errichtung der Klimastation auf dem Floß

steht noch, nur die rechte Fahrspur ist abgebrochen und in den Fluss gestürzt. Alle steigen aus den Fahrzeugen, und bald entbrennt eine hochtechnische Diskussion, in der Worte wie Statik, Masse, Geschwindigkeit, Belastung und Gewichtsverteilung hin und her schwirren. Mittendrin springt Mvogo plötzlich in den Versorgungs-Laster namens „Großmutter“, über den er gebietet, und braust einfach über die Brücke hinweg.

Später verbringen wir noch etliche Stunden damit, das Ende eines Wolkenbruchs abzuwarten. Doch am Abend haben wir Eseh erreicht und unser Camp errichtet. Dazu mussten wir allerdings die gesamte Bevölkerung des Städtchens anheuern, um unsere Sachen auf dem Kopf über einen steilen und bei Nässe rutschigen Weg sechs Kilometer hinab zum See zu tragen – darunter auch die harten, schweren Koffer, die einige Mitglieder des Teams unpassenderweise gepackt hatten, weil sie dachten, wir würden bis direkt ans Ufer fahren.

In der Mitte des Zeltlagers deponieren wir eine blaue, mit Sauerstoffkanistern gefüllte Kiste: zehn Minuten rettendes Atmungsgas pro Person für nur zehn von uns. Einige versuchen zunächst, ihre Zelte auf einem Hügel aufzuschlagen, damit sie sicherer sind, falls sich der See gerade jetzt zu seiner nächsten Explosion entschließt. Doch das erweist sich als zu schwierig, und mit einer leichten, aber nagenden Beklommenheit in der Magengegend errichten wir unser Lager unten im Hauptcamp.

Die erste Aufgabe am nächsten Tag besteht darin, ein Floß zu bauen. Kling und seine Kollegen hatten nach der Explosion von 1986 mitten im See eine Klimastation auf einer schwimmenden Plattform installiert, um Daten über Temperatur, Wind, Sonnenscheindauer und Regenmenge zu sammeln. Diese Station ist ein Opfer der Witterungseinflüsse geworden und funktioniert nicht mehr. Auch das alte Floß muss ersetzt werden. Zusätzlich will das Team Thermistoren (elektrische Thermo-Widerstände) installieren, die in neun verschiedene Tiefen herabhängen sollen, um den Temperaturverlauf zu überwachen – Temperaturänderungen spiegeln Strömungen und Mischungsvorgänge im See wider. Außerdem gilt es, Sonden hinunterzulassen, die den Druck des Kohlendioxids messen. Erst wenn sich diese Instrumente an Ort und Stelle befinden, wird man gefahrlos über eine größere Entgasung nachdenken können. Jeder Schritt dieses Unternehmens ist zu überwachen, um festzustellen, ob er die Bedingungen im See in gefährlicher Weise verändert.

Das zu bauende Floß muss stabil genug sein, um die neue Klimastation zu tragen und als Verankerung für die verschiedenen Sonden zu dienen. Außerdem soll es, wenn möglich, genügend Platz bieten, dass die Wissenschaftler von ihm aus Probenehmer hinablassen können, um Wasser für die Messung von Kohlendioxidkonzentrationen heraufzuholen. Die Japaner unter Leitung des Ingenieurs Yutaka Yoshida vom Yoshida-Ingenieurberatungsbüro in Iwate nehmen sich der Aufgabe an.

Als Abdulahi zwei Tage später im Camp eintrifft, ist das Floß fertig. Auch die Klimastation haben wir schon zusammengebaut und darauf befestigt. Wir bringen Abdulahi in einem der Zelte unter und leihen ihm ein paar Kleidungsstücke für die Dauer seines Aufenthalts. Am nächsten Tag hilft er Evans und Riseng bei ihrer Arbeit. Die Thermistoren müssen abgewickelt, für bestimmte Tiefen markiert und mit einem Klebeband fest zusammengebunden werden. Zu diesem Zweck schickt Riseng ihre Assistenten mit den langen Kabeln, die fast zum


MARGUERITE HOLLOWAY

Zeltlager des Forscherteams am Südufer des Nyos-Sees

Grund des Sees reichen werden, auf gegenüberliegende Seiten der Maisfelder. Siebzehn Männer verteilen sich zwischen den hellgrünen Pflanzen mit Kabeln über ihren Schultern – der letzte ist am Rand eines Feldes in über 200 Meter Entfernung kaum noch auszumachen.

Abdulahi hilft Riseng beim Abwickeln der Thermistoren. Danach entschließt er sich, eine Fahrt auf den See hinaus zu wagen, wo er zusammen mit Evans und Tanyileke die Anker für das neue Floß überprüft. Die Sonne brennt und blendet. Einige von uns sitzen benommen im Lager herum. Ein Fulani-Mann bringt Avocados als Geschenk. Der Tag zieht sich in die Länge.

Abdulahi kehrt vom See zurück. Er hat jetzt einen der Walkie-Talkies und ist zum Feldkoordinator avanciert, der jedem zu finden hilft, was oder wen er gerade benötigt. Wir sitzen auf einer Ausrüstungskiste und sprechen – zwischen atmosphärisch gestörten Anfragen über den Sender – über seinen Wunsch nach einer Familie. Er hat eine Frau getroffen, die er heiraten möchte und die ihn heiraten will, erzählt er, doch ihre Familie erlaubt das nicht. Sie hoffen auf einen reichen Freier statt eines Elektroingenieurs. (Das ist der Beruf, für den sich Abdulahi vor Jahren entschieden hat.)

Mit der Installation des Floßes, dem Herunterlassen der Instrumente und der Entnahme von Wasserproben haben Kling und seine Kollegen den Anfang für die Entgasungsaktion gemacht, die mit etwas Glück im Januar oder Februar 2001 beginnen wird. In den vergangenen Jahren haben Kusakabe und Yoshida einen Plan zur Entgasung der Seen entwickelt, den die Regierung Kameruns der japanischen Behörde für internationale Zusammenarbeit vorgelegt hat. Danach sollen im Nyos-See zwölf Rohrleitungen in drei verschiedene Tiefen führen; durch sie kann das stark CO_2-haltige Wasser aufsteigen – anfangs vielleicht mit der enormen Geschwindigkeit von 320 Kilometern pro Stunde –, um sein Gas freizusetzen. Für den Monoun-See sind drei Rohrleitungen vorgesehen.

Die Machbarkeit des Verfahrens wurde an beiden Seen bereits getestet. Michel Halbwachs von der Universität von Savoyen beschaffte 1992 von der französischen Regierung und der Europäischen Union die Mittel für einen ersten Entgasungstest am Monoun-See. Zusammen mit einigen Kollegen, darunter Tanyileke, ließ er zwei Rohre, eines mit 5 und eines mit 14 Zentimetern Durchmesser, hinunter und saugte per Motorpumpe Wasser vom Grund des Sees an. Wegen des Druckunterschieds stieg nach kurzer



MARGUERITE HOLLOWAY

Das Floß mit Messgeräten wird zu Wasser gelassen

Zeit eine sich selbst erhaltende Fontaine gasreichen Wassers in beiden Leitungen auf, und Kohlendioxid entwich. Durch Schließen von Ventilen in den Rohren gelang es, den Vorgang nach Belieben zu unterbrechen.

Nach dem Erfolg des Monoun-Versuchs gab es 1995 einen ähnlichen Test am Nyos-See. Mit finanziellen Mitteln von Gaz de France ließen Halbwachs und Kollegen ein 14 Zentimeter breites und 205 Meter langes Rohr hinab. Diesmal lief jedoch nicht alles so glatt wie am Monoun-See. Als die Fontaine anfing emporzuschießen, hob sich zum Entsetzen der Wissenschaftler die Rohrleitung vom Grund. Zum Glück wurde keine Explosion ausgelöst.

Streit um Entgasungspläne

Halbwachs entwickelte einen anderen Entgasungsplan als Yoshida und Kusakabe. Danach waren lediglich fünf Rohrleitungen für den Nyos-See sowie ein ferngesteuerter Ein-Aus-Schalter vorgesehen, der via Satellit von Frankreich aus bedient werden konnte. Im Oktober 1999 trafen sich die beiden Wissenschaftler-Gruppen in Yaoundé, um sich auf ein gemeinsames Vorgehen zu einigen. Dies schien gelungen zu sein, doch am darauf folgenden Tag brach der Konflikt bei einem öffentlichen Treffen mit Mitgliedern eines neu gegründeten interministeriellen Entgasungskomitees von Kamerun wieder auf. Halbwachs stellte seinen Plan mit den fünf Rohren vor und Kusakabe seinen mit den zwölf Leitungen. Die Minister waren irritiert von diesem Streit, und für eine kurze Zeit, die sich qualvoll in die Länge zu ziehen schien, sah es so aus, als ob das gesamte Projekt scheitern würde.

Doch schließlich erklärte Henri Hogbe Nlend, Minister für wissenschaftliche Forschung und Technologie sowie Leiter des Komitees, die Meinungsverschiedenheiten für unbedeutend. „Jede Zahl, die jetzt genannt wird, ist falsch, es handelt sich lediglich um Schätzungen", sagte er mit Nachdruck. „Die Technologie, die uns hier erklärt wurde, wird sich weiterentwickeln." Niemand, fügte er hinzu, könne von den Architekten einer Kathedrale verlangen, im Vorfeld eines derartig großen Unternehmens schon Auskunft über letzte Details zu geben.

Immerhin war es eine gewaltige Leistung gewesen, die verschiedenen an dem Projekt beteiligten Ministerien unter einen Hut zu bringen. Ohne ihre gemeinsame Unterstützung würden die Straßen zu den Seen nicht ausgebaut und die angrenzenden Gebiete nicht evakuiert; auch das Militär von Kamerun stünde bei den Entgasungsaktionen nicht mit Sauerstofftanks für den Fall einer Explosion bereit. Da wollte Minister Nlend das Vorhaben nicht in letzter Minute an einem kleinlichen Expertenstreit scheitern lassen. Inzwischen ziehen alle Wissenschaftler wieder an einem Strang.

Diese Auseinandersetzung war ungewöhnlich für eine Gemeinschaft von Forschern, die mehr als ein Jahrzehnt lang ▶

im Wesentlichen gut zusammengearbeitet hatten. Anscheinend standen hinter dem Streit nicht so sehr wissenschaftliche Differenzen; denn letztlich sind die Unterschiede zwischen den beiden Entwürfen vernachlässigbar. Die Hauptursache war offenbar mangelnde Kommunikation zwischen den Forschern bei ihren Bemühungen, Geldmittel aufzutreiben. Halbwachs fühlte sich von einem Werk



MARGUERITE HOLLOWAY

Dorfbewohner aus Nyos trinken aus ihrem See

ausgeschlossen, für das er die Fundamente gelegt hatte. Die anderen sagen, sie hätten alle Finanzierungsmöglichkeiten ausschöpfen wollen, dabei aber die ganze Zeit geglaubt, Halbwachs würde mit ihnen gemeinsame Sache machen. „Wir haben immer gedacht, dass alle, die sich um diese Seen Sorgen machen, zusammenarbeiten", sagt Kling.

Die Finanzierung des Projekts zu sichern war in der Tat ein verzweifeltes Unternehmen. Zwei Seen könnten explodieren, Tausende von Menschen sind in Gefahr, und es gibt eine einfache Lösung, die nur etwa eine Million Dollar kostet. Und dennoch. Verschiedene Forscher erhielten zwar Beihilfen von ihren Regierungen oder Institutionen für die Untersuchung der Seen; doch für die Entgasung war kein Geld zu bekommen. So wurde 1992 mit Unterstützung der Unesco und des Entwicklungsprogramms der Vereinten Nationen ein Treffen zum Thema Entgasung organisiert. Doch keine der beiden Institutionen bewilligte Geld für das derzeitige Projekt, sagt Kling.

Die Wissenschaftler probierten es mit wenig Erfolg auch über andere Kanäle. Kling und ein Kollege versuchten beispielsweise Ölgesellschaften zu interessieren – die in Kamerun einflussreich sind und lukrative Geschäfte machen. Sie hatten kein Glück. Und noch im Jahr der Uno-Konferenz appellierte Kling an die US-Behörde für internationale Entwicklung (AID). Er erhielt jedoch eine Abfuhr, weil man dort damals nicht geneigt war, Projekte in Kamerun zu unterstützen. Nach der Hilfe für die Opfer gleich nach den Katastrophen „hat AID sich etwas zurückgezogen", erklärt Christina Neal, Geologin der Behörde im Büro für Katastrophenhilfe im Ausland. „Kamerun hat Probleme mit der Demokratie und einer ordentlichen Regierung."

Kusakabes Bemühungen, Geld von der japanischen Behörde für internationale Zusammenarbeit zu bekommen, verliefen gleichfalls im Sande. Einige glauben, die japanische Regierung sei an der Entgasung nicht so interessiert gewesen wie an anderen Projekten in Kamerun. Es gibt allerdings auch die Meinung, dass die Regierung Kameruns, die das Projekt als Hilfsmaßnahme mit höchster Priorität hätte einstufen müssen, um Mittel zu erhalten, sich nicht darauf einigen konnte, weil ein Minister stattdessen einen Brunnen in seinem Dorf favorisiert habe.

Die Politik mag eine Rolle gespielt haben, aber das größere Problem besteht darin, dass viele Hilfsorganisationen dazu tendieren, eher auf Katastrophen zu reagieren als ihnen vorzubeugen. Viele Kenner der Szene haben immer wieder auf die Kurzsichtigkeit dieser Einstellung hingewiesen. Doch sie wurden nicht gehört. Erst kürzlich hätte, sagt Neal, ein Umdenken bei den zuständigen Stellen eingesetzt. Sie verweist auf jüngste Bemühungen um Vorbeugung bei AID und der US-Bundesbehörde für Notfallmanagement.

Neals Interesse für Kamerun und seine Seen sowie ihrer Präferenz für Prävention war es großenteils zu verdanken, dass im Herbst 1999 schließlich 433 000 Dollar für Kling und das Team bewilligt wurden. Direkter Anlass war der Ausbruch des Kamerunberges im Frühjahr 1999. Nach diesem Zeichen verstärkter vulkanischer Aktivität in der Region schickte das Büro für Katastrophenhilfe im Ausland John P. Lockwood, der früher beim Geologischen Dienst der USA war und den Nyos-See untersucht hatte, nach Kamerun. Er sollte feststellen, welche Gefahr von dem Gewässer ausging. Unter anderem traf er sich mit Vertretern der US-Botschaft in Yaoundé sowie mit Wissenschaftlern und Ministern aus Kamerun. Als Ergebnis seiner Visite äußerte er die Überzeugung, dass das Büro, wenn es Kamerun wirklich helfen wolle, Geld für die Entgasung der Seen geben sollte.

Obwohl das Projekt jetzt endlich voranzukommen scheint, fühlen sich viele Forscher irgendwie schuldig – als ob sie mehr hätten tun sollen, um die zuständigen Stellen zum Handeln zu bewegen. „Wir Wissenschaftler fragen uns immer noch, ob es ausgereicht hat, einfach Berichte an Gott und die Welt zu schicken",



MARGUERITE HOLLOWAY

Literaturhinweise

Rollover in Volcanic Crater Lakes; a Possible Cause for Lake Nyos Type Desasters. Von A. Rice in: Journal of Volcanology and Geothermal Research, Bd. 97, S. 233, 4/2000.

The Deadly Cloud Hanging over Cameroon. Von Sam Freeth in: New Scientist, 15. 8. 92, S. 23.

*Weblinks unter: **www.spektrum.de/aktuellesheft.html***

MARGUERITE HOLLOWAY

Trügerische Idylle: Auch der Monoun-See könnte ausbrechen

sagt Tanyileke eines späten Nachmittags am Nyos-See. Wir sitzen auf einem Kühlgerät in der Sonne, und die brütende Hitze lastet selbst spät am Tag noch bleiern und betäubend auf uns. „Sie waren nicht alarmierend genug, die Empfänger hochschrecken zu lassen."

Während wir uns unterhalten, trifft eine neunköpfige Delegation aus dem Dorf Nyos ein. Die Männer sind fein herausgeputzt – Hüte, Sonnenschirme, helle Gewänder – und überbringen einen Brief von ihrem Häuptling Fon Tang-Nembong: „Unsere liebe Besucher wir sind sehr sehr glücklich Euch Leute hier in unserem See zu sehen. Wir hier zu sagen willkommen zu Euch allen." Tanyileke beschreibt, was das Team macht und warum. „Jeden Tag kann sich die nächste Eruption ereignen", warnt er und fügt hinzu: „Falls wir irgendetwas tun, was gegen Eure Tradition verstößt, müsst Ihr uns das sagen."

Eine solche Kommunikation ist aus vielen Gründen sehr wichtig – nicht nur für gute Beziehungen. Sie erinnert die Menschen daran, wachsam gegenüber dem scheinbar sicheren See zu sein. Zugleich fördert sie eine positive Einstellung gegenüber der Wissenschaft, von der sich Tanyileke auch eine günstige Wirkung auf seine Pläne erhofft, aus Nyos ein Forschungszentrum zu machen, wenn der See entgast ist.

Team-Mitglied Hubert Mvogo hilft beim Abwickeln der Thermistoren

Ein fatales Gerücht

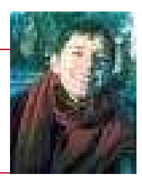
Und schließlich hilft das Gespräch, ein fatales Gerücht zu bekämpfen. Nach Aussage der Anthropologin Eugenia Shanklin vom College von New Jersey kam es auf, als ein Geistlicher beim Besuch der verwüsteten Orte äußerte, sie sähen aus wie nach der Detonation einer Neutronenbombe. Damit war die Geschichte von der Bombe geboren.

Eine Version besagt, Amerikaner und Israelis hätten sie gezündet, um an Diamanten unter dem See zu gelangen. Nach einer anderen Version legte dagegen ein blonder Friedenskorps-Arbeiter die Bombe, damit anschließend Amerikaner in der Region leben könnten.

Die Gerüchte schaden dem Team – sowie dem Friedenskorps, der US-Botschaft in Yaoundé und vielleicht auch den israelischen Ärzten, die 1986 Katastrophenhilfe leisteten. Außerdem könnten sie die geplante Evakuierung für die Dauer der Entgasungsaktion erschweren, falls einige der genannten Gruppen daran mitwirken. Doch Shanklin findet es verblüffend, wie da ein moderner Mythos aufgekommen ist. In gewisser Weise gleicht er den alten Legenden aus der Region. Eine davon legt den Schluss nahe, dass es schon früher Katastrophen wie die vom Nyos- und Monoun-See in den achtziger Jahren gegeben hat: Ein Mythos des Kom-Volkes spricht von einem See, der plötzlich explodierte und einen Stamm auslöschte.

Die Delegation aus Nyos scheint für ihren Teil nicht misstrauisch gegenüber der Arbeit des Teams zu sein. „Wir sind sehr glücklich, dass Sie hergekommen sind", sagt Tamaki Cheteh. „Jeder in Nyos ist krank wegen dem Gas." Und dann äußert ein Mitglied der Delegation einen Wunsch, der so bemerkenswert ist wie Abdulahis Ausflug auf den See: Der Mann bittet darum, das Wasser probieren zu dürfen, das viele seiner Verwandten getötet hat. Tanyileke bietet ihm etwas von der kohlendioxidhaltigen Probe an, die dicht über dem Grund des Sees entnommen wurde. Abdulahi sieht aus der Nähe zu. Schließlich kommen alle heran und kosten der Reihe nach von dem Nass aus den Tiefen ihres Sees. ■

Wer das Entgasungsprojekt unterstützen möchte, kann Spenden an das Cameroon Degassing Project, Department of Biology, University of Michigan, 830 N. University, Ann Arbor, MI 48109-1048 schicken.



Marguerite Holloway *ist freie Redakteurin bei Scientific American.*

Fermi, Szilard und der erste Atomreaktor

Kurz vor Beginn des Zweiten Weltkriegs trafen in den USA zwei aus Europa emigrierte Physiker zusammen, die nur in ihrer Begeisterung für die Wissenschaft übereinstimmten. Dennoch glückte dem ungleichen Paar der Bau des ersten Kernreaktors.

VON WILLIAM LANOUETTE



BILDMONATGE VON JENNIFER JOHANSEN; AIP EMILIO SEGRÈ VISUAL ARCHIVES (SZILARD UND FERMI); CORBIS (ATOMPILZ); ARGONNE NATIONAL LABORATORY (BRIEF VON EINSTEIN AN ROOSEVELT)

Im Januar 1939 zogen zwei europäische Physiker in das King's Crown Hotel nahe der Columbia University in New York. Zwar hatten Enrico Fermi und Leo Szilard schon zuvor Briefe ausgetauscht, doch ihre Begegnung im Hotel war reiner Zufall. Aus dem Treffen ging eine der lebhaftesten – und streitbarsten – Partnerschaften in der Wissenschaftsgeschichte hervor.

Beide waren Flüchtlinge vor dem in Europa grassierenden Rassenwahn, und jeder der beiden besaß wichtige Teile des Puzzles, das schließlich den Weg zur Kernenergie weisen sollte. Aber wie sich bald herausstellte, hatten sie höchst unterschiedliche Ansichten, Arbeitsmethoden und Eigenheiten. Wäre es Fermi und Szilard nicht gelungen, trotz aller Differenzen zusammenzuarbeiten, so hätte nicht 1942 die erste kontrollierte nukleare Kettenreaktion stattgefunden, und das amerikanische Manhattan-Projekt hätte nicht 1945 zum Bau der ersten Atombomben geführt. Szilard meinte später: „Falls die Nation uns Dank schuldet – und vielleicht tut sie das nicht –, dann dafür, dass wir es so lange wie nötig miteinander ausgehalten haben."

Der 38-jährige Enrico Fermi war gerade aus Rom in New York angekommen. Unterwegs hatte er in Stockholm Station gemacht, um den Nobel-Preis des Jahres 1938 für Physik entgegenzunehmen. Die Auszeichnung wurde ihm für Elementumwandlungen durch Neutronenbeschuss verliehen; dabei war es ihm anscheinend gelungen, so genannte Transurane – künstliche instabile Elemente, die schwerer sind als das schwerste natürliche Element Uran – durch den Beschuss von Uran mit Neutronen zu erzeugen. Aus Furcht vor neuen Rassengesetzen beschlossen Fermi und seine jüdische Frau, nicht mehr ins faschistische Italien heimzukehren. Stattdessen nahm er eines von vier amerikanischen Angeboten an und ging an die Columbia University.

Eine Begegnung auf verschlungenen Wegen

Leo Szilard, ein ungarischer Jude von 40 Jahren, kam auf verschlungeneren Wegen nach New York. Er war in Budapest aufgewachsen und 1919 nach Berlin übersiedelt, um bei Albert Einstein zu studieren und mit ihm zu arbeiten. Unter anderem entwickelten sie damals gemeinsam eine elektromagnetische Kühlpumpe bis zur Patentreife (Spektrum der Wissenschaft 6/1997, S. 94); doch zwei Jahrzehnte später sollte ihr Verhältnis historische Bedeutung gewinnen.

Als Hitler 1933 die Macht übernahm, floh Szilard sofort nach London. Im selben Jahr konzipierte er die Idee einer nuklearen „Kettenreaktion", die gemäß seinem Patentantrag von 1934 „elektrische Energie" und möglicherweise „eine Explosion" liefern sollte. Solche Kettenreaktionen fanden bald darauf tatsächlich in Kernreaktoren und Nuklearwaffen statt; doch zunächst galt es, ein dafür passendes Element zu entdecken. Nach vier Jahren vergeblicher Versuche an der Universität Oxford sowie an den Universitäten von Rochester und Illinois in den USA ging auch Szilard an die Columbia University.

Fermi war ein strikter Akademiker, der sein Leben ganz und gar einer brillanten Physik-Karriere widmete; Politik interessierte ihn kaum. Als häuslicher Mensch zog er mit seiner Familie bald aus dem New Yorker Hotel in ein Reihenhaus in New Jersey um. Er stand jeden Tag um halb sechs auf und verbrachte die zwei Stunden vor dem Frühstück damit, an seinen Theorien zu feilen und die Experimente des kommenden Tages zu planen. Ungewöhnlich für einen Forscher des 20. Jahrhunderts ist, dass Fermi nicht nur ein begabter Theoretiker war, sondern auch gern manuell arbeitete. Wenn er nicht Vorlesungen hielt, bastelte er mit seinen Assistenten im Labor. ▶



Albert Einstein
Old Grove Rd.
Nassau Point
Peconic, Long Island

August 2nd, 1939

F.D. Roosevelt,
President of the United States,
White House
Washington, D.C.

Sir:

Some recent work by E.Fermi and L. Szilard, which has been
municated to me in manuscript, leads me to expect that the elemen
ium may be turned into a new and important source of energy in th
mediate future. Certain aspects of the situation which has arisen
quick action on the

Die konfliktreiche Zusammenarbeit zwischen Leo Szilard (links) und Enrico Fermi (rechts) führte nicht nur zum Bau des ersten Kernreaktors, sondern auch – auf dem Weg über Albert Einsteins legendären Brief an Präsident Roosevelt – letztlich zur Entwicklung der Atombombe.

Als Gastforscher ohne feste Anstellung, ohne eigene Vorlesungsreihe oder eigenes Labor hielt der Junggeselle Szilard kaum Lehrveranstaltungen ab, publizierte wenig und dilettierte in Wirtschaftswissenschaft und Biologie. Er lebte in Hotels und Universitätswohnheimen, wo er sich mit Vorliebe stundenlang in der Badewanne räkelte, um neue Ideen auszuhecken. Eine solche Eingebung besagte etwa, die National Science Foundation – das amerikanische Gegenstück zur Deutschen Forschungsgemeinschaft – solle zweitklassigen Wissenschaftlern keinerlei Forschungsmittel gewähren. Szilard las begierig Zeitung, grübelte unablässig über finanzielle, politische und militärische Probleme nach und hatte stets zwei gepackte Koffer parat, um jeder neuen Eruption des Faschismus sofort entfliehen zu können.

Als notorischer Spätaufsteher tauchte er in der Universität oft erst zum Mittagessen auf, um sich anschließend auf Kollegen zu stürzen und ihnen tiefgründige Fragen zu stellen oder Experimente vorzuschlagen, die sie ausführen sollten. „Du hast zu viele Ideen“, sagte ihm schließlich der künftige Nobelpreisträger Isidor Isaac Rabi, „bitte geh weg“.

Der Physiker Bernard Feld – zuletzt am Massachusetts Institute of Technology tätig – arbeitete seinerzeit mit Fermi und Szilard als Forschungsassistent des Letzteren an der Columbia University. Er charakterisierte die beiden so: „Fermi ging erst von Punkt A nach Punkt B, wenn er alles nur irgend Mögliche über A wusste und vernünftige Sicherheiten über B besaß. Szilard sprang von A nach B und wunderte sich dann, warum man Zeit mit B und C vergeudete.“

Wenige Tage nach dem zufälligen Treffen zwischen Fermi und Szilard im King’s Crown Hotel landete der dänische Physiker Niels Bohr in New York mit einer wichtigen Nachricht aus Europa: Die Physikerin Lise Meitner – eine Jüdin, die von Berlin nach Stockholm geflohen war – hatte eine Erklärung gefunden, warum die Berliner Chemiker Otto Hahn und Fritz Strassmann beim Beschuss von Uran mit Neutronen nicht Transurane erzeugt hatten, sondern leichtere Kernfragmente: Sie hatten den Atomkern gespalten. Erst im Jahre 1966 wurden alle drei für die Entdeckung der Kernspaltung mit dem Enrico-Fermi-Preis geehrt, nachdem zunächst nur Hahn und Strassmann dafür den Nobelpreis des Jahres 1944 erhalten hatten (siehe dazu Spektrum der Wissenschaft 5/1998, S. 80).

Durchs Bohrs Bericht gelangte Fermi zu einem besseren Verständnis seiner eigenen Uran-Experimente von 1934: Er hatte nicht Transurane erzeugt, sondern unwissentlich Atomkerne gespalten.

Szilard fand die Neuigkeit bedrohlicher. Er erkannte, dass Uran das Element war, das sich für die in seinem Patentantrag von 1934 beschriebene Kettenreaktion eignete. Auf Grund seines politischen Gespürs hatte er dieses Patent der britischen Admiralität als Geheimpapier übergeben, um deutsche Wissenschaftler nicht auf die Möglichkeit atomarer Explosivstoffe hinzuweisen. Die Entdeckung der Kernspaltung bestätigte Szilards Befürchtung, eine Atombombe könnte in naher Zukunft Realität werden.

Literaturhinweise

Enrico Fermi, Physicist. Von Emilio Segrè. University of Chicago Press, 1995.

Genius in the Shadow: A Biography of Leo Szilard, the Man behind the Bomb. Von William Lanouette (mit Bela Silard). University of Chicago Press, 1994.

Kettenreaktion. Das Drama der Atomphysiker. Von Jost Herbig. Hanser, München 1976.

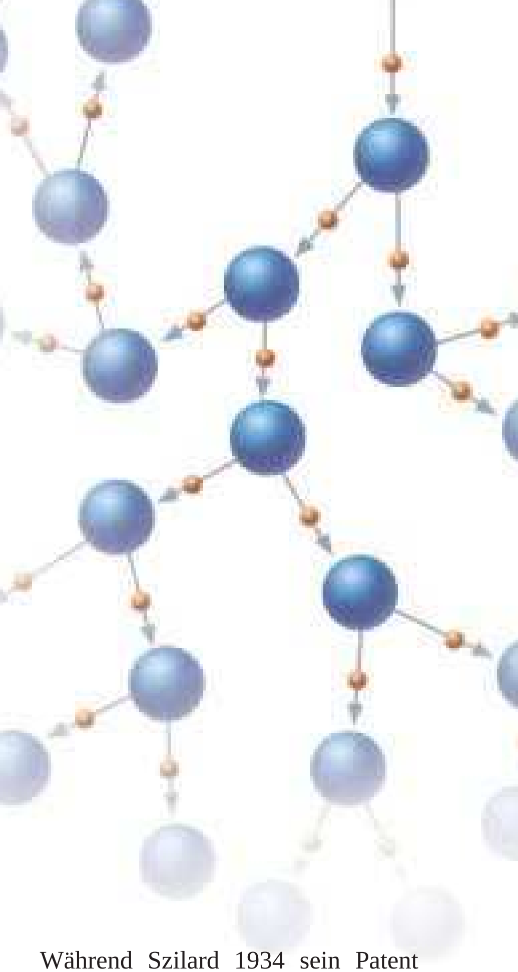
Collected Works of Leo Szilard. Bd. 1, 2 und 3. MIT Press, 1972, 1978 und 1987.

Enrico Fermi: Collected Papers. Bd. 1 und 2. University of Chicago Press, 1962 und 1965.

Weitere Hinweise unter ***www.spektrum.de/aktuellesheft.html***

Transurane oder Kernfragmente?

Die Idee der nuklearen Kettenreaktion war Szilard gekommen, als er 1933 in London an einer Straßenecke stand. Erst ein Jahr zuvor war das Neutron entdeckt worden, und die Physiker stellten sich das Atom nun als eine Art winziges Sonnensystem vor, in dem die negativ geladenen Elektronen einen Kern aus positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen umkreisen. Da das Neutron keine Ladung trägt, vermag es in den Kern einzudringen, ohne von ihm abgestoßen zu werden. Szilard erkannte nun, dass bei der durch Neutronenbeschuss ausgelösten Kernspaltung die den Atomkern zusammenhaltende Bindungsenergie frei wird. Außerdem kann der gespaltene Kern einige Neutronen abgeben, die nun ihrerseits weitere Atome spalten. Wenn jedes gespaltene Atom mehr als ein Neutron entlässt, wächst der Prozess exponentiell an, und in Sekundenbruchteilen können Millionen Atome gespalten und riesige Energiemengen freigesetzt werden. Wie Szilard später erfuhr, kam auch Fermi durch Bohrs Nachricht auf die Möglichkeit einer Kettenreaktion, doch hielt Fermi sie für extrem unwahrscheinlich.



Während Szilard 1934 sein Patent einreichte, wurde Fermi in Rom zum weltweit anerkannten Experten für den Neutronenbeschuss von Atomen. Wie er herausfand, konnte er die Neutronen abbremsen, indem er sie eine Paraffinschicht passieren ließ, und erhöhte dadurch die Wahrscheinlichkeit, dass sie vom Zielkern absorbiert wurden. Seine Resultate mit Uran waren verwirrend. Manchmal absorbierte der Kern Neutronen und verwandelte sich in ein schwereres Uran-Isotop. Doch manchmal erzeugte der Neutronenbeschuss völlig neue Elemente. Als die deutsche Chemikerin Ida Noddack von Fermis Experimenten erfuhr, schlug sie vor, die neuen Produkte chemisch zu analysieren, um festzustellen, ob es sich um Fragmente gespaltener Atome handle. Doch da Fermi sich nur auf die Physik von Beschuss und Absorption konzentrierte, verfolgte er diesen Gedanken nicht weiter. Hätte er es getan, wäre er vielleicht Jahre vor Lise Meitner auf die Kernspaltung gestoßen.

Im Frühjahr 1939 unternahmen sowohl Fermi als auch Szilard an der Columbia University Experimente zum besseren Verständnis der Kernspaltung. Szilard verschaffte dem kanadischen Physiker Walter Zinn eine Radium-Beryllium-Neutronenquelle aus England. Damit wiesen Zinn und Szilard nach, dass pro Spaltung mehr als zwei Neutronen frei wurden. Fermi und sein Assistent Herbert Anderson verwendeten für ein ähnliches

JENNIFER JOHANSEN

PATENT SPECIFICATION



630,726

Application Date: June 28, 1934. No. 19157/34.
" " July 4, 1934. No. 19721/34.

One Complete Specification left (under Section 16 of the Patents and Designs Acts, 1907 to 1946): April 9, 1935.

Specification Accepted: March 30, 1936 (but withheld from publication under Section 30 of the Patents and Designs Acts 1907 to 1932).

Date of Publication: Sept. 28, 1949.

Index at acceptance:—Class 39(iv), P(1:2:3x).

PROVISIONAL SPECIFICATION
No. 19157 A.D. 1934.

Improvements in or relating to the Transmutation of Chemical Elements

I, Leo Szilard, a citizen of Germany and subject of Hungary, c/o Claremont Haynes & Co., of Vernon House, Bloomsbury Square, London, W.C.1, do hereby declare the nature of this invention to be as follows:—

United States Patent Office

2,708,656
Patented May 17, 1955

1

2,708,656

NEUTRONIC REACTOR

Enrico Fermi, Santa Fe, N. Mex., and Leo Szilard, Chicago, Ill., assignors to the United States of America as represented by the United States Atomic Energy Commission

Application December 19, 1944, Serial No. 568,904

8 Claims. (Cl. 204—193)

2

Szilards englisches Patent für die Idee der Kettenreaktion wurde der britischen Admiralität übergeben und blieb bis nach dem Krieg geheim (oben). Ein amerikanisches Patent für den eigentlichen Reaktor wurde Fermi und Szilard gemeinsam zuerkannt (unten).

Experiment eine stärkere Radon-Beryllium-Quelle – mit uneindeutigen Ergebnissen. Szilard vermutete, die Quelle sei so stark, dass einige Neutronen den Kern glatt durchstießen und sich im Detektor unter die durch Kernspaltung erzeugten Neutronen mischten. Szilard lieh Fermi seine englische Neutronenquelle, die viel klarere Resultate lieferte.

Danach versuchten die beiden Forscher zusammenzuarbeiten – und der Krach war unvermeidlich. Szilard scheute manuelle Arbeit und heckte lieber immer neue Ideen aus, während Fermi von allen Mitarbeitern erwartete, dass sie bei Experimenten selbst Hand anlegten. Zwar respektierte jeder die Fähigkeiten des anderen, aber sie gingen einander auf die Nerven. Doch da sie erkannten, dass sie auf einander angewiesen waren, wandten sie sich an George Pegram, den Leiter der physikalischen Fakultät, damit er ihre separate Arbeit koordinierte. Pegrams Pendeldiplomatie gelang es, Fermis Präzision mit Szilards Ideenreichtum zu versöhnen. Zusammen mit Anderson erkannten die ungleichen Partner, dass mit langsamen Neutronen „eine nukleare Kettenreaktion aufrechterhalten werden kann“.

Der Atommeiler

So häufig es zu Zusammenstößen zwischen Fermi und Szilard kam, so selten waren anfangs Kollisionen zwischen Neutronen und Kernen. Erst wenn die Neutronen durch so genannte Moderatoren – etwa Fermis Paraffin – abgebremst wurden, erhöhte sich die Spaltungsrate. Im Jahre 1939 wussten die Physiker auch schon, dass so genanntes schweres Wasser ein wirksamer Moderator ist. Gewöhnliches Wasser besteht aus zwei Wasserstoffatomen und einem Atom Sauerstoff; in schwerem Wasser tritt an die Stelle des Wasserstoffs dessen Isotop Deuterium. Auch in heutigen Kernreaktoren dient schweres Wasser als Moderator für natürliches Uran, während für angereichertes Uran normales Wasser verwendet wird.

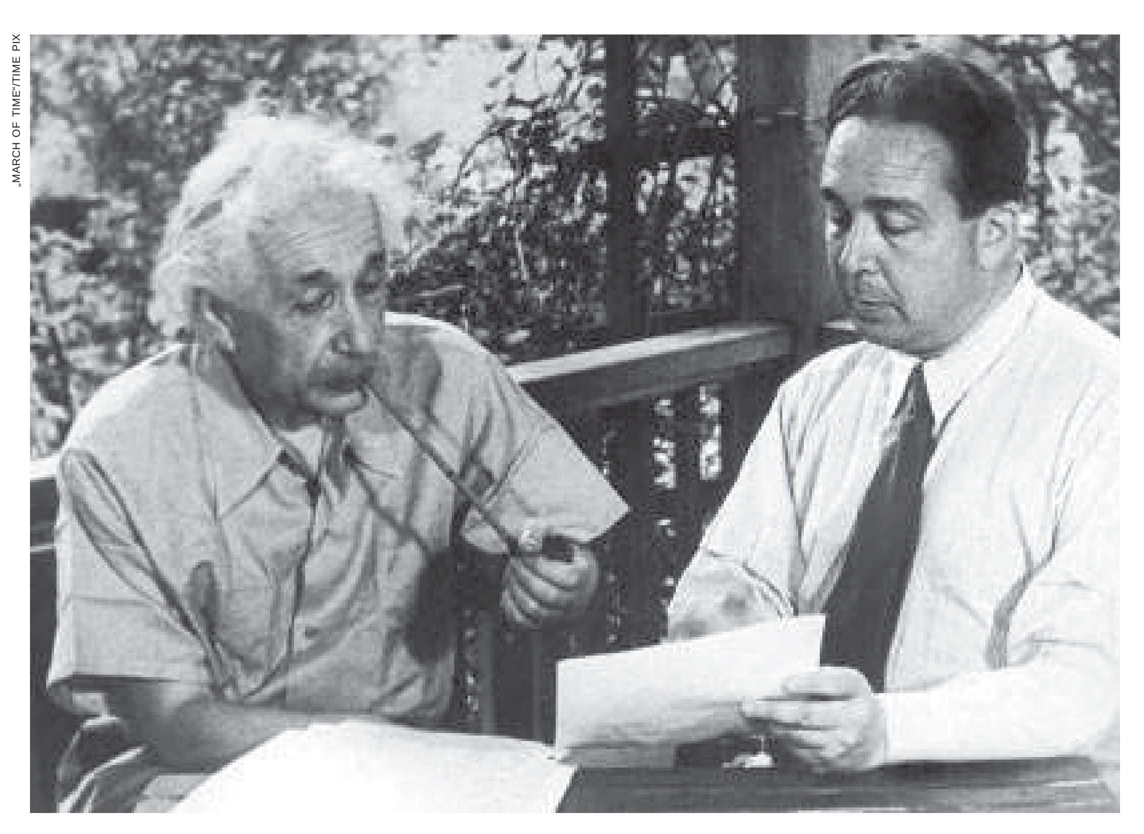
Doch schweres Wasser war rar und teuer. Die groß angelegten Experimente, die Szilard vorhatte, erforderten einen leichter zugänglichen und billigeren Moderator, und er entdeckte einen, den die deutschen Physiker übersehen hatten.

Wie Szilard befürchtet hatte, war die deutsche Erforschung der Atomenergie im Frühjahr 1939 schon im Gange. Sowohl deutsche wie amerikanische Physiker erkannten, dass Graphit – die amorphe Form des Kohlenstoffs, die in Bleistiften verwendet wird – sich als Moderator eignet. Doch die Deutschen kamen wieder davon ab, weil Graphit zu viele Neutronen absorbierte; stattdessen konzentrierten sie sich auf schweres Wasser, das schwer zu beschaffen war. Szilard, der oft mit der Bahn nach Boston oder Buffalo fuhr, um Rohmaterial für Fermis Versuche zu beschaffen, erkannte, dass käuflicher Graphit kleine Beimengungen von Bor enthielt, das gierig Neutronen absorbierte. Er bestellte darum speziell fabrizierten reinen Graphit – was einen besonders heftigen Streit mit Fermi auslöste.

Anderson maß die Neutronenabsorption in dem reinen Graphit und fand, dass er in der Tat einen guten Moderator abgeben würde. Szilard empfahl, die Testergebnisse geheim zu halten. Fermi, ganz der reine Wissenschaftler, widersetzte sich diesem Bruch mit der guten akademischen Tradition, ein Resultat nach Prüfung durch Fachkollegen in wissenschaftlichen Zeitschriften zu publizieren. „Fermi verlor echt die Beherrschung“, erinnerte Szilard sich später. „Er fand das wirklich absurd.“ Doch wieder einmal schlichtete Pegram, und Fermi willigte unter den gegebenen Umständen widerstrebend ein, Selbstzensur zu üben.

Mit dem Graphit-Moderator sah Fermi nun wenigstens einen Hoffnungsschimmer für eine echte Kettenreaktion. Bezüglich der Frage, wie realistisch diese Hoffnung sei, waren Fermi und Szilard wiederum höchst unterschiedlicher Mei- ▶

„MARCH OF TIME"/TIME PIX



Einstein und Szilard beraten über den Brief, der die amerikanische Regierung von der Notwendigkeit überzeugen soll, Kernwaffen zu entwickeln. Die Szene ist nachgestellt; sie stammt aus dem 1946 gedrehten Film „Atomic Power".

nung. Szilard sah die Deutschen schon fast als Sieger in einem nuklearen Rüstungswettlauf, aber Fermi tat dies grob als Spinnerei ab. Er meinte, so etwas wie Atombomben werde es frühestens in 25 oder 50 Jahren geben; das Erzeugen einer echten Kettenreaktion sei „eine entfernte Möglichkeit" mit vielleicht zehnprozentiger Wahrscheinlichkeit.

„Zehn Prozent ist keineswegs eine entfernte Möglichkeit, wenn es bedeutet, dass wir vielleicht daran sterben", erwiderte Isidor Rabi. Szilard bemerkte, wie unterschiedlich er und Fermi dieselbe Information auslegten. „Wir beide wollten vorsichtig sein", erinnerte Szilard sich später, „aber Fermi hielt es für vorsichtig, die Möglichkeit dieses Ereignisses herunterzuspielen; ich hingegen hielt die Annahme für vorsichtig, es werde eintreten, und meinte, man müsse die nötigen Vorkehrungen treffen."

Zu diesen Vorkehrungen gehörte, dass Szilard 2000 Dollar lieh, um Fermis Forschung zu unterstützen. Dennoch zeigte Fermi, wie wenig ihn die denkbaren Folgen der Nuklearforschung kümmerten, indem er an die Universität von Michigan ging, um kosmische Strahlen zu untersuchen. Die erste erfolgreiche Konstruktion eines Kernreaktors entstand darum weder in einem Labor noch in einer Bibliothek, sondern in Briefen.

Wie es Szilards Art war, drängte er darauf, „groß angelegte Experimente" zu beginnen, und zwar „sofort". Fermi blieb wieder einmal skeptisch. Szilard schlug vor, abwechselnde Schichten von Uran und Graphit in einem Gitter anzuordnen, dessen Geometrie die Neutronenstreuung und die anschließenden Spaltungsvorgänge festlegen würde. Fermi konterte mit einem homogenen Aufbau, bei dem Uran und Graphit wie Kies gemischt würden. Dieser Vorschlag ärgerte Szilard; er unterstellte Fermi, dieser wolle nur eine Konfiguration, die sich einfacher berechnen lasse. Fermi antwortete, nach gründlicher Überlegung habe Szilards Gitter-Idee ihn nun doch überzeugt. Nachdem er einmal überredet war, setzte Fermi all seine beträchtlichen Fähigkeiten ein, um die physikalischen Eigenschaften des Gitters zu bestimmen und das für den Bau eines Reaktors erforderliche Personal zu organisieren.

Unterstützung von höchster Ebene

Szilard erkannte, dass er und Fermi trotz all ihrer intellektuellen Fähigkeiten die Unterstützung wichtiger Verbündeter brauchten, wenn ihr Projekt gelingen sollte. Die Helfer bildeten ein seltsames Trio: der amerikanische Präsident Franklin D. Roosevelt, FBI-Chef J. Edgar Hoover und Albert Einstein.

Im Laufe des Sommers erfuhr Szilard, dass Deutschland Uran hortete. Er nahm an, dies bedeute Kernspaltungsforschung, und wollte die amerikanische Regierung warnen. Mit dem Instinkt eines Fachmanns für Öffentlichkeitsarbeit wandte er sich an seinen Freund und Mentor Einstein, der sich rund hundert Kilometer östlich von New York in einem Sommerhaus auf Long Island aufhielt. Szilard informierte den weltberühmten Physiker über die Kettenreaktion. „Daran habe ich überhaupt nicht gedacht", antwortete Einstein; endlich sah er einen Mechanismus vor sich, der die Verwandlung von Masse in Energie gemäß seiner berühmten Äquivalenzgleichung verwirklichen konnte.

Szilard besuchte Einstein zwei Mal und schlug ihm schließlich einen Brieftext zur Unterzeichnung vor. „Szilard konnte alles außer Auto fahren", erinnert sich ein mit Szilard befreundeter Wissenschaftler, der ebenfalls aus Ungarn stammte, vor Hitler geflohen war und nun beim zweiten Besuch am Steuer saß. „Und ich konnte Auto fahren. Also fuhr ich Szilard zum Sommerhaus... Einstein war ein Demokrat: Er lud nicht nur Szilard zu einer Tasse Kaffee ein, sondern auch den Fahrer." Darum war Edward Teller – der spätere Vater der Wasserstoffbombe – dabei, als Einstein in einem alten Schlafrock und Hausschuhen den unterdessen berühmten Brief an Präsident Roosevelt unterschrieb.

Das Schreiben ist auf den 2. August 1939 datiert und beginnt: „Kürzliche Arbeiten von E. Fermi und L. Szilard ..." Im Folgenden warnt es vor deutscher Atomwaffenforschung und drängt die USA, selbst solche Forschung zu treiben.

Szilard übergab den Brief an den Investmentbanker Alexander Sachs, einen wirtschaftspolitischen Berater des Präsidenten. Am 1. September brach der Zweite Weltkrieg aus, und als Roosevelt im Oktober endlich den Brief bekam, stimmte er zu, dass etwas geschehen müsse, „damit die Nazis uns nicht in die Luft sprengen". Zu diesem Zweck schuf er das Uranium Committee, ein beratendes Gremium, dem neben Szilard weitere emigrierte Wissenschaftler als Mitglieder angehörten. Binnen Wochen wurden ihnen 6000 Dollar für Forschungen an der Columbia University überwiesen.

Verdächtige Gestalten

Nach dem Krieg sagte Einstein, er habe eigentlich nur als Briefkasten für Szilard gedient. Doch im Jahre 1940 war Einstein noch einmal gezwungen, eine entscheidende Rolle zu spielen, als die amerikanische Armee Fermi und Szilard um ein Haar die politische Unbedenklichkeit abgesprochen und den Zugang zu geheimen Forschungen verweigert hätte. Auf Grund „höchst verlässlicher Quellen" kamen die Army-Überprüfer zu dem paradoxen Schluss, Fermi – der vor dem Faschismus geflohen war – sei „zweifellos ein Faschist", und Szilard, in Wahrheit von unablässiger Furcht vor den Nazis erfüllt, sei „sehr pro-deutsch". Vielleicht hatten Szilards laute Warnrufe, Deutschland könne den Krieg gewinnen, zu solchen Fehldeutungen geführt. Der Bericht buchstabierte außerdem Szilards Namen auf zwei unterschiedliche Arten, beide Mal falsch. Die Army befand bezüglich beider Männer: „Beschäftigung dieser Person mit geheimen Arbeiten wird nicht empfohlen" – trotz der Tatsache, dass die einzigen geheimen Arbeiten, die zu jener Zeit in den USA in Frage kamen, in den Köpfen von Fermi und Szilard stattfanden.

William Lanouette *promovierte 1973 in Politologie an der London School of Economics. Seine Doktorarbeit, in der er Gebrauch und Missbrauch wissenschaftlicher Informationen durch amerikanische und britische Regierungsstellen verglich, qualifizierte ihn für seine gegenwärtige Tätigkeit als Fachmann für Energie- und Wissenschaftspolitik beim General Accounting Office der USA (das etwa unserem Bundesrechnungshof entspricht). Er hat unter anderem eine Biografie über Leo Szilard verfasst sowie zahlreiche Vorträge über das Manhattan-Projekt und dessen Protagonisten gehalten.*

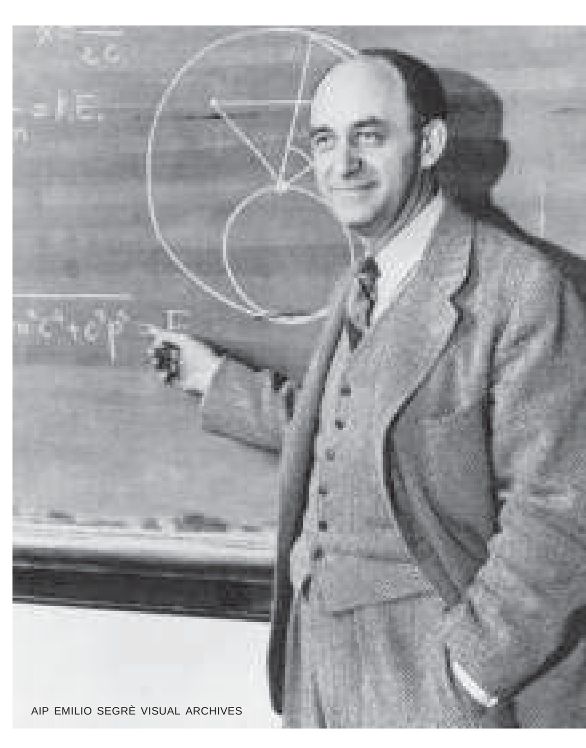
Hätte die Army sich durchgesetzt, wären natürlich keinerlei Fördermittel mehr geflossen, und die Kernforschung im Regierungsauftrag, mit der Fermi und Szilard gerade erst anfingen, hätte ein frühes Ende gefunden. Um diese Fehlentscheidung abzuwenden, wurde das FBI auf Druck des Weißen Hauses angewiesen, „ihre Loyalität gegenüber den Vereinigten Staaten zu verifizieren". FBI-Chef J. Edgar Hoover schickte Agenten los, um Einstein zu befragen, dessen Pazifismus übrigens später ihn selbst den Behörden verdächtig machen sollte. Einsteins Wort galt so viel, dass im November 1940 Regierungsgelder zur Columbia University flossen; dennoch hörte die Verdächtigung Fermis und Szilards erst Jahre, nachdem sie US-Bürger geworden waren, allmählich auf.

Nachdem die Förderung gesichert war, konstruierte Fermis Team nun systematisch so genannte „Piles" – geschichtete „Haufen" von Uran und Graphit gemäß Szilards Gitteridee –, um das für eine Kettenreaktion geeignete Mischungsverhältnis und die optimale Konfiguration herauszufinden. Einen Tag vor dem japanischen Angriff auf Pearl Harbor bewilligte Präsident Roosevelt ein umfassendes Regierungsprogramm zur Entwicklung der Atombombe. Im Frühjahr 1942 übersiedelten Fermi, Szilard und das übrige Columbia-Team zur Universität Chicago, um dort unter höchster Geheimhaltung ein „metallurgisches Laboratorium" für die Erforschung der Kettenreaktion einzurichten. Schon im Juni wurde das Labor dem Manhattan-Projekt der Armee angegliedert.

Im Herbst wurde ein Pile aus Uran-Kugeln, eingebettet in Graphitblöcke, konstruiert. Am 2. Dezember 1942 leitete Fermi in einem Squash-Keller unter dem Football-Stadium der Universität das Experiment, bei dem die erste kontrollierte Kettenreaktion ausgelöst wurde. Nach dem historischen Versuch standen Fermi und Szilard noch eine Weile allein vor ihrem Reaktor. Sie schüttelten einander die Hand, erinnerte sich Szilard, „und ich sagte, mir schiene, dieser Tag würde als schwarzer Tag in die Geschichte der Menschheit eingehen".

Konflikt und Konsens

Im Jahre 1945, gegen Ende des Krieges, waren Fermi und Szilard erneut unterschiedlicher Meinung. Szilard hatte die Entwicklung der Atombombe als Verteidigungswaffe gegen Deutschland vorangetrieben. Nach dem Sieg über Hitler war Szilard dagegen, die Bombe offensiv gegen Japan einzusetzen; ihre Vernichtungskraft solle nur demonstriert werden, um zur Kapitulation aufzufordern. Fermi – unterdessen wissenschaftlicher Berater des Regierungskomitees, das den Einsatz der Bombe diskutierte – hielt eine Demonstration für ungeeignet. Die Regierung war derselben Meinung, und im August wurden die Städte Hiroshima und Nagasaki dem Erdboden gleichgemacht.



Nobelpreisträger Fermi war nicht nur ein brillanter Theoretiker, sondern auch ein begabter Experimentator – eine unter den Physikern des 20. Jahrhunderts seltene Doppelbegabung.

Nach dem Krieg war Fermi dafür, dass die Armee weiterhin die Kernforschung kontrolliere, während Szilard den Kongress überzeugte, eine neue zivile Atomenergiebehörde einzurichten. Einig waren sich die beiden 1950 gegen Szilards alten Freund Teller, als sie einmütig die Entwicklung der Wasserstoffbombe kritisierten. Fermi nannte die H-Bombe „eine Waffe, deren Wirkung praktisch Völkermord gleichkommt".

Ein gemeinsames Patent für den Fermi-Szilardschen „Neutronenreaktor" wurde erstmals 1955 publiziert, ein Jahr nach Fermis Tod. Szilard beschäftigte sich mit Molekularbiologie und den Problemen der Rüstungskontrolle im Atomzeitalter bis zu seinem Tod im Jahre 1964. Fermi charakterisierte Szilard als „extrem brillant", aber als jemanden, der „es anscheinend genießt, Leute zu verwirren". Szilard schrieb über Fermi: „Ich mochte ihn am liebsten bei den seltenen Gelegenheiten, in denen er wütend wurde (außer natürlich, wenn er wütend auf mich wurde)". ■

Spektrum-Report:

Zahntechnik

Frühere Erkennung von Krankheiten sowie schonendere Präparations- und Therapiemethoden sollen den Verlust von Zahnsubstanz, den herkömmliche Techniken mit sich bringen, deutlich veringern. Die Zahnarztpraxis mausert sich von der Reparaturwerkstatt zum Dienstleistungsbetrieb.

DIAGNOSTIK

Karies unter Strom

Fluoreszenz- und Widerstandsmessung helfen, Zahnfäule schon im Frühstadium zu erkennen. Damit steigen die Chancen für eine schonende Behandlung.

Von Adrian Lussi

Sucht man unter Medizinern nach einer Gruppe, die von der Tätigkeit her dem Zahnarzt am ehesten entspricht, fällt die Wahl vermutlich auf die Chirurgen. Denn um die Zähne gesund zu halten, muss der Dentist meist erkranktes Gewebe entfernen. Das ist recht unbefriedigend; deshalb entwickeln Experten neue Verfahren, um beispielsweise Karies schon so frühzeitig zu erkennen, dass sich eine Füllung noch vermeiden lässt. Vorsorgemaßnahmen wie gute Mundhygiene, Fluoridversorgung und zuckerarme Ernährung können dann eine Ausbreitung der Karies verhindern; Wiedereinlagern von Salzen in die entkalkte Zahnoberfläche, die „Remineralisation“, vermag geschädigten Zahnschmelz quasi zu reparieren. Regelmäßige Kontrollen des Krankheitsverlaufs zeigen dann, ob eine Füllung auch weiterhin verzichtbar bleibt.

Karies, zu Deutsch „Zahnfäule“, ist ein bakteriell-chemischer Prozess, bei dem saure Stoffwechselprodukte der Bakterien im Zahnbelag die Zahnhartsubstanz auflösen. Sie beginnt mit einer nur unter dem Mikroskop sichtbaren Entkalkung der betroffenen Schmelz-, Dentin- oder Zementoberflächen. Bei weiterem Fortschreiten verfärbt sich der Schmelz lokal kreidig, oft auch braun. An diesen Stellen wird er weich, bis schließlich die Oberfläche einbricht – das bekannte „Loch im Zahn“ ist entstanden. In diesem Stadium lässt sich Karies zwar leicht diagnostizieren, doch ist bereits eine größere Füllung erforderlich.

Schwierig zu diagnostizieren sind hingegen Defekte im Anfangsstadium oder solche, die – obwohl schon bis ins Dentin vorgedrungen – eine äußerlich noch intakte Oberfläche zeigen. Gerade die bewährten klassischen Hilfsmittel Spiegel und Sonde reichen bei beginnendem Karies in den „Tälern“ der Kaufläche oder im Zahnzwischenraum nicht aus, wie viele Untersuchungen gezeigt haben.

Dort lässt sich die Erkrankung derzeit nur durch Röntgen entdecken. Neben dem herkömmlichen Belichten, Entwickeln und Fixieren spezieller Filme kommt seit einigen Jahren das digitale Röntgen in Gebrauch. Die Strahlung

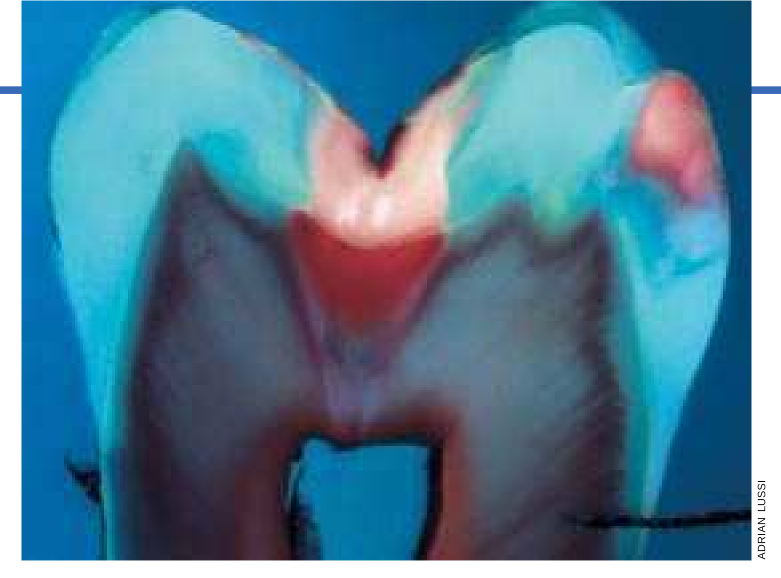


EYE OF SCIENCE / MECKES

Millionen von Bakterien leben in einem Milliliter Speichel. Die meisten davon sind harmlos oder sogar nützlich, einige aber (hier grün und stark vergrößert) produzieren Säuren, die den Zahnschmelz angreifen und so Karies auslösen.

wird dabei je nach System von Halbleiter-Detektoren oder fluoreszierenden Folien aufgenommen. Damit entfällt nicht nur ein insgesamt erheblicher Material- und Chemikalieneinsatz, die digitale Methode ist auch empfindlicher, kommt also mit geringerer Strahlenintensität und Bestrahlungsdauer aus und belastet den Patienten entsprechend weniger. Ferner ist es möglich, die Bilder auf dem Computer zu bearbeiten, um kleinere Belichtungsfehler auszugleichen und so die Diagnostik zu erleichtern.

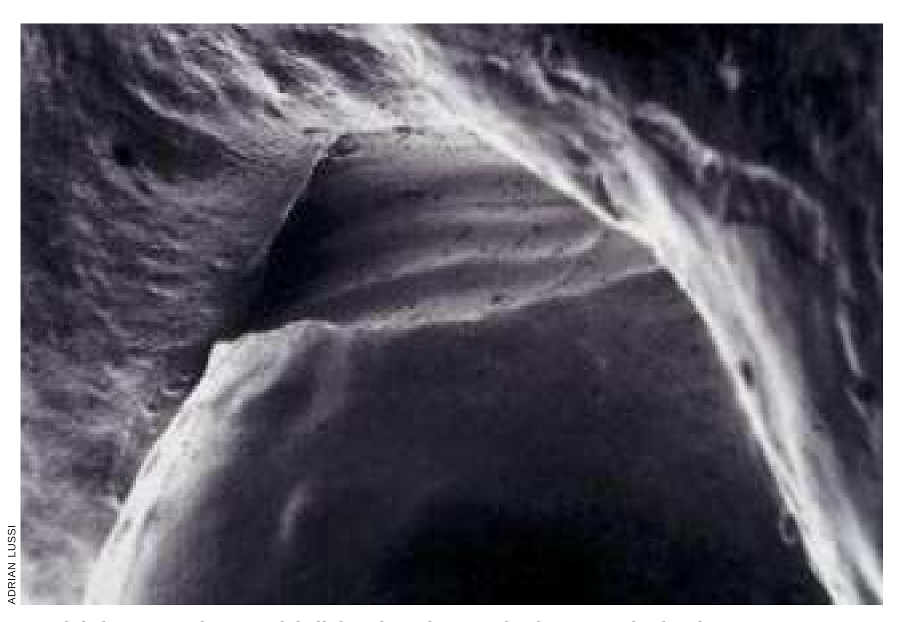
Für die Früherkennung von Karies unter der Kaufläche gibt es mittlerweile zwei neuartige Techniken: Die Fluoreszenz- und die Widerstandsmessung, erstere ist in Europa seit zwei Jahren, letztere seit etwa zehn Jahren auf dem Markt.



Ein kranker Zahn, bei ultraviolettem Licht aufgenommen. Was hier gelborange erscheint, sieht „von außen" völlig intakt aus. Der Karies darunter (rot) ist mit bloßem Auge nicht zu erkennen.

ADRIAN LUSSI

Bestrahlt Laserlicht mit einer Wellenlänge von 655 Nanometer und einer Laserpointern vergleichbaren Leistung von einem Nanowatt die durch Karies veränderte Zahnhartsubstanz, beginnt diese Stelle zu fluoreszieren, und zwar umso stärker, je weiter fortgeschritten die Entkalkung schon ist. Ursache sind Fluorophore genannte Moleküle, die durch den Bakterienstoffwechsel entstehen. Das Fluoreszenzlicht hat dabei Wellenlängen von mehr als 680 Nanometer, lässt sich also einfach bei der Beobachtung herausfiltern und messen (die einwirkende Lichtenergie überführt die Moleküle in einen angeregten Zustand; beim Übergang in den Grundzustand geht ein kleiner Teil der Energie als Wärme verloren, dementsprechend langwelliger ist das Fluoreszenzlicht). Die Messspitze des ersten Gerätes dieser Art, das die Firma KaVo aus Biberach (Baden-Württemberg) auf den Markt gebracht hat, besteht aus einer zentralen Lichtzuführung und konzentrisch darum angeordneten Lichtleitfasern für die Erfassung des vom Zahn fluoreszierten Lichts. Ein sich ändernder Ton ermöglicht dem Arzt durch Drehen der Spitze das stärkste Messsignal, also die Stelle mit der größten Kariesausdehnung, zu ermitteln, ohne irgendeine Anzeige am Gerät beobachten zu müssen. Dieser Maximalwert dient dann im Rahmen der Behandlung auch zur Verlaufskontrolle.



ADRIAN LUSSI

Zu viel des Guten kann gefährlich sein: Dieser Zahn ist am Hals durch hartes Putzen in horizontaler Richtung schon teilweise abgetragen. Die Aufnahme des Rasterelektronenmikroskops zeigt deutlich die hinterlassenen Riefen im Schmelz.

Karies auf der Kaufläche verändert zudem auch den elektrischen Widerstands des Zahne: Gesunder Schmelz wie auch gesundes Dentin isolieren, beginnen aber Strom zu leiten, wenn sie kariös werden. Der Widerstand zwischen der Zahnoberfläche und einer Elektrode wird dann kleiner. Auch bei scheinbar intakten Oberflächen liefert diese Methode frühzeitig verlässliche Ergebnisse.

Die durch direkte Säureeinwirkung verursachte Erosion sieht anders aus als die bei Karies. Der erodierte Schmelz wird zwar in der Anfangsphase flächenhaft entkalkt, erweicht dabei aber nicht. Änderungen des elektrischen Widerstands sind zu gering für eine verlässliche Messung, und ohne Bakterien entstehen auch keine Fluorophore. Die Diagnostik erfordert hier in erster Linie ein geschultes Auge, neuere Techniken gibt es nicht. Erst in späteren Stadien wird das Dentin ebenfalls in Mitleidenschaft gezogen, und die Zahnoberfläche glänzt nur noch matt. Sie lässt sich dann eindeutig von keilförmigen Defekten unterscheiden, wie sie vor allem Putzen der Zähne mit harten Bürsten und in horizontaler Richtung verursachen. Aufgeweichte Zahnoberflächen werden durch mechanischen Abrieb weit mehr beschädigt oder abgetragen als gesunde. Eine frühe Diagnostik von Karies oder Erosionen ist deshalb für eine erfolgreiche Prophylaxe unabdingbar.

Prinzipiell gilt: Ohne sorgfältige Prophylaxe lassen sich langfristig Zahnschäden nicht verhindern. Vorbeugung steht auf Platz eins der Wunschliste der Ärzte, verbesserte diagnostische Methoden können ihm helfen, den Ruf des Chirurgen loszuwerden. ■

Der gelernte Chemie-Ingenieur **Adrian Lussi** *studierte Zahnmedizin an der Universität Bern. Dort habilitierte er 1993 zum Thema „Zahnerhaltung und Präventivzahnmedizin". Seit 1995 leitet er die Abteilung für Kinderzahnmedizin und Strukturbiologie an der Berner Universitätsklinik für Zahnerhaltung.*

ZAHNERSATZ

Eine Krone ist eine Krone

Der meist metallkeramische Zahnersatz ist ein hochwertiges technisches Produkt, das sich mit neuen Werkstoffen stetig weiterentwickelt.

Von Heiner Weber

Sollten Sie, verehrter Leser, noch alle Zähne Ihr eigen nennen, dann gehören Sie hier zu Lande einer seltenen Spezies an. Nicht weniger als zehn Millionen Kronen werden in Deutschland alljährlich allein im Rahmen der gesetzlichen Krankenversicherung eingesetzt. Und stets wiederholt sich dabei dieselbe etablierte Prozedur: Unter örtlicher Betäubung trägt der Arzt etwa 1,5 Millimeter Zahn ab, nimmt vorher und nachher Abdrücke des Gebisses, fertigt ein Provisorium und passt nach etwa einer Woche den vom Zahntechniker gefertigten Ersatz ein. So unangenehm der Prozess ist, lässt er sich doch oft nicht vermeiden, wenn Karies oder Unfälle Zähne stark zerstört haben, Brücken oder herausnehmbare Prothesen zu befestigen sind. Auch das Schienen gelockerter Zähne, die Wiederherstellung einer Idealform und die Korrektur kleinerer Fehlstellungen leisten Kronen.

Dem Patienten bleiben die hohen Anforderungen an Werkstoffe und Herstellung leider meist verborgen, sonst würde er eventuelle Zuzahlungen vielleicht eher verschmerzen. Kronen sind hochwertige technische Produkte und stehen an vorderster Front der Werkstoffentwicklung!

Je nach Position im Mund muss ein Zahn und dann entsprechend auch sein Ersatz erhebliche Kaukräfte von 300 bis 500 Newton aufnehmen. Demgemäß wählt der Zahnarzt den Werkstoff beziehungsweise den Materialverbund aus. Klassisch zu nennen sind Metalllegierungen mit einem Goldgehalt von mindestens 75 bis 90 Prozent. Solche Edelmetalllegierungen halten der Korrosion durch im Mund gebildete und von außen zugeführte Säuren stand, zudem lassen sie sich gut verarbeiten. Zusätze erhöhen die mechanische Festigkeit und den Schmelzpunkt, sodass der Keramikbrand bei 900 bis 950 Grad Celsius die Form intakt lässt.

Komplexer Schichtaufbau

So bildet Eisen mit Platin einen Komplex, der die Legierung härtet; Iridium verfeinert die Kornstruktur und verbessert so die Homogenität des Materials. Dazu kommen unedle Bestandteile wie Zink, Zinn und Indium, die über Oxidbrücken an die keramischen Massen binden und so deren Haftung auf dem Metall vermitteln.

Metalllegierungen ohne Goldanteil, etwa auf Nickel/Chrom- oder Kobalt/Chrom/Molybdän-Basis kosten deutlich weniger, mitunter nur ein Zehntel der edelmetallhaltigen Werkstoffe. Sie sind überdies fester und erlauben deshalb grazilere Formen zu fertigen. Bei bekannter Allergie des Patienten gegen Nickel oder Kobalt sollte der Arzt von solchen Werkstoffen aber aus rechtlichen Gründen absehen, obwohl die Prothesen deutlich weniger davon abgeben als etwa ein Stahlkochtopf.

Aus ästhetischen Gründen wird das Metall hinter zahnfarbener Keramik verborgen. Überdies verschleißt diese Werkstoff-Klasse kaum und gilt als gut verträglich für den Organismus. So entstehen die Metallkeramik genannten Verbundwerkstoffe, deren Fertigung eine genaue Prozessführung erfordert. Meist trägt der Techniker die Keramik in drei bis vier Schichten auf ein filigranes, nur 0,2 bis 0,4 Millimeter dickes Metallgerüst auf. Die erste deckt farblich ab und sorgt für die Haftung auf der Oxidschicht. Jede weitere verändert die Form der Prothese und ihre Erscheinung im Licht, also ihre Farbe, Transparenz, Reflexion und dergleichen.

Die Temperaturführung beim Brennen wählt man so, dass keine Risse oder Abplatzungen aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehung der Werkstoffe auftreten können; die verschiedenen Schichten werden zur Sicherheit meist nacheinander gebrannt.

Spezielle Keramiken eignen sich sogar für Prothesen ohne Metallanteil, nämlich die aus dem Haushalt von Kochfeldern her bekannten Glaskeramiken und Keramiken aus Aluminium-Zirkonoxid. Beide System bestehen jeweils aus zwei Phasen: Der kristalline Anteil in Glaskeramiken verleiht ebenso wie das Aluminiumoxid im zweiten System Festigkeit, die amorphe Glasphase und Zirkonoxid vermögen sehr gut Druck aufzunehmen und somit die Keramiken eigene Sprödigkeit auszugleichen. Auch hier fertigt man zunächst ein Gerüst, das dann noch mit weiteren Schichten versehen wird.

Fast hundert Jahre nach seiner Einführung in die Zahnheilkunde ist auch heute noch das Gussverfahren mit verlorener Wachsform der meistgenutzte Weg

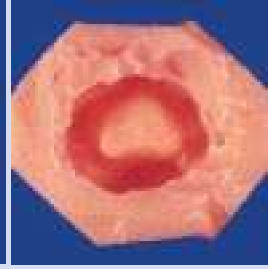
Der lange Weg zum Inlay


Ein Loch ist im Backenzahn


Krankes Gewebe wurde entfernt, eine „Kavität“ aufgebohrt.


Der Zahnarzt hat einen Vorabdruck mit elastischem Material genommen.


Nach einem Zwischenschritt entstand dieses Gipsmodell.


Anhand des Gipsmodell wurde diese Silikonform erstellt.

für Metallteile: Der Zahntechniker gießt den in der Arztpraxis genommenen Abdruck – meist aus Silikon bestehend – mit einem besonderen Hartgips aus. Die resultierende Gipsform dient entweder selbst als Präzisionsmodell oder wird in ein festeres Material kopiert. Die auf diesem Modell sichtbaren beschliffenen und zu überkronenden Zähne bezeichnet man als Modellstümpfe. Für das Fertigen der Metallteile der Krone gibt es nun zwei Wege: Der Zahntechniker modelliert sie auf diesen Stümpfen in Wachs nach und bettet diese Wachsteile in eine feuerfeste Masse. (Während des anschließenden, mehrstündigen Aufheizens härtet letztere aus, während das Wachs verdampft. So entsteht schließlich eine Hohlform für den Metallguss oder das Verpressen keramischer Pulver. Alternativ dazu werden die Stümpfe mit einem Silberlack bestrichen und so elektrisch leitend gemacht, dann in einem Goldbad galvanisch mit dem Metall beschichtet, bis ein dünnes Feingoldgerüst mit Wandstärken von 0,1 bis 0,2 Millimeter resultiert. Darauf werden dann keramische Massen aufgebrannt.

Neben diesen gängigen gibt es auch neuere Verfahren zur Herstellung von Metallgerüsten, die ihre klinische Probe bestanden haben. So wird die Modellierung in Gips beim computergesteuerten Fräsen aus einem Rohling durch eine Rechnermodellierung mittels CAD-Programmen ersetzt (Computer Aided Design). Das Hauptproblem sind die unregelmäßigen Geometrien etwa der Kroneninnenwand oder der Kauflächen, die sehr präzise arbeitende, aber auch sehr teure Mehrachsen-Fräsmaschinen erfordern.

Glaskeramische Kronen werden als Pulver in Formen verpresst, die über den Zwischenschritt eines Wachsmodells entstehen. Für den Zahnersatz aus Aluminium-Zirkonoxid eignet sich das in der Porzellanherstellung gebräuchliche Schlickerverfahren: Eine Suspension aus einer wässrigen Lösung und Keramikpulver wird auf eine Gipsform gegeben, deren Poren langsam die Feuchtigkeit entziehen. So wächst der so genannte Scherben, der dann gebrannt wird. Das resultierende Gerüst wird zur Verstärkung noch zusätzlich mit Glas infiltriert.

Entspricht die fertige Krone am Rand und auf der Kaufläche den Qualitätsanforderungen und erklärt sich auch der Patient mit ihr einverstanden, befestigt der Arzt sie meist mit Zementen aus Phosphat-, Karboxylat oder Glasionomerverbindungen. Weil diese praktisch lichtundurchlässig sind und somit die Farbe der Krone beeinflussen, wurde für die sehr transparenten vollkeramischen Systeme nach anderen Möglichkeiten gesucht. Es boten sich Kunststoffe an, wie sie mittlerweile für Füllungen verwendet werden. Nach Vorbehandlung von Zahnhartsubstanz und Keramik wird die Krone damit eingeklebt. Das erhöht zudem die physikalische Belastbarkeit der sonst eher weniger festen transparenten Werkstoffe. Kleben statt Zementieren ist ganz sicher ein interessantes Entwicklungsfeld – nicht nur für Kronen. ■

Heiner Weber *habilitierte 1980 an der Universität Düsseldorf. Seit 1982 ist er Ärztlicher Direktor der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik am Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Universität Tübingen.*



PROTHESEN

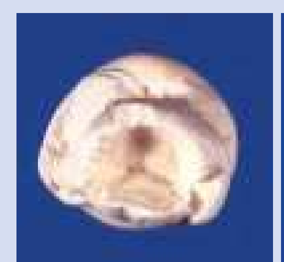
Implantate & Co.

Künstliche Wurzeln im Kiefer, so genannte Implantate, kommen den natürlichen Verhältnissen näher als andere Prothesen.

Von Peter A. Ehrl

Die Zahnfee braucht in Deutschland ein gutes finanzielles Polster: Nicht weniger als etwa 15 Millionen Zähne werden in hiesigen Praxen alljährlich gezogen. Damit der Mund gesund bleibt und auch künftig zu kauen vermag, fertigen Zahntechniker und Ärzte Ersatz an. Mittlerweile lassen sich drei Verfahren unterscheiden, von denen die Implantate etliche Vorteile haben, allerdings deutlich teurer kommen können.

Die schon den Etruskern bekannte Form solcher Prothesen ist herausnehmbar. Die Kunst dabei: Sie muss einerseits leicht zu entnehmen und andererseits sehr belastbar sein. Dafür gibt es heute technisch ausgereifte Halteelemente: Klammern genannte gebogene Metallarme klemmen durch Eigenspannung an gesunden Zähnen, als Geschiebe bezeichnete Fräsungen an Kronen und Prothesen passen exakt ineinander, Teleskopkronen sind hauchdünne Kronen, auf die als ein Gegenstück die Prothese aufgesetzt wird. ▶



Ein „Arbeitszahn“ aus einer feuerfesten Masse ist das Abbild des Originals.



Aus Keramik wird das Inlay in der Kaufläche des Arbeitszahnes modelliert.



Das gebrannte Inlay, hier noch im Arbeitszahn.



Separation des Inlays nach dem Brand.



Fertig: Das Inlay füllt die Kavität im Backenzahn.

ALLE FOTOS: KARL E. DECKART / MIRKOMAKRO



SULZERCALCITEK

Um ihre Oberfläche zu vergrößern, haben viele Implantate ein Schraubgewinde und zusätzlich eine Beschichtung mit Hydroxylapatit (links). Durch Aufrauen entsteht eine noch größere Oberfläche und damit ein innigerer Kontakt von Knochen und Implantat. Die sehr präzise, zinnenförmige Struktur dient der sicheren, formschlüssigen Verbindung mit der aufgesetzten Krone (rechts).



DEGUSSA

Die letzten beiden Möglichkeiten der Verankerung erfordern Überkronung gesunder Zähne, kosten also intakte Substanz, die erste kommt nur scheinbar ohne aus, denn die Klammern reiben Hartsubstanz ab. Darüber hinaus haben herausnehmbare Prothesen mitunter deutliche Nachteile: Zum einen empfindet sie der Patient anfangs meist als Fremdkörper, zum anderen werden die zur Befestigung genutzten Zähne über die Maßen belastet. Klammern als Halteelemente führen langfristig zum Abrieb von Schmelz, manchmal muss ein gesunder Zahn überkront, das heißt beschliffen werden, und mitunter verstärkt Hebelwirkung die auf die Zähne wirkende Kraft. Am Ende droht dann die Totalprothese. Dass sie heute immer seltener vorkommt, ist ein Erfolg von Prävention und moderner Therapie.

Eindeutig komfortabler ist fest sitzender Zahnersatz; auch verursacht er weniger Folgeschäden. Problematisch sind aber insbesondere die bekannten „Brücken“: Intakte Zähne rechts und links einer Lücke werden beschliffen und überkront, daran wird der überbrückende Zahnersatz dauerhaft befestigt. Der Nachteil ist zunächst der Verlust gesunder Substanz. Bei sehr großen Prothesen droht zudem wieder Überlastung, denn die „Brückenpfeiler“ müssen ja nun die gesamte Kaukraft aufnehmen.

Hinzu kommt ein generelles Problem: Bei Zahnverlust geht meist auch Kieferknochen verloren – gerade im ästhetisch wichtigen Frontbereich lassen sich solche Defekte durch konventionelle Brücken und Prothesen nicht immer kaschieren.

Eine medizinisch und ästhetisch optimale Lösung bieten Implantate. Das sind fest im Kiefer eingepflanzte Verankerungen, die mit einer einzelnen Krone versehen oder als Träger von Prothesen genutzt werden. Zu Beginn der Entwicklung, die bis in die zweite Hälfte des vergangenen Jahrhunderts hineinreicht, hatte man sie nur für Notfälle in Betracht gezogen. Seit ihrer wissenschaftlichen Anerkennung im Jahre 1982 hat sich die Implantologie aber so weiterentwickelt, dass man diese Technik heute vielfach als die überlegene Methode bezeichnen kann. Der Grund: Implantate helfen fast immer, die Begleit- und Folgeschäden herkömmlicher Prothesen zu vermeiden. In einer Studie von 1996 erwiesen sich 80 Prozent der untersuchten Implantate nach zwanzig Jahren als noch voll funktionstüchtig. Kein anderes Gebiet der Zahnmedizin hat im vergangenen Jahrzehnt auch nur annähernd so viele wissenschaftliche Untersuchungen hervorgebraucht wie die Implantologie.



DEGUSSA

Implantate sind künstliche Zahnwurzeln. Ihr Grundgerüst – meist Schrauben oder Stifte – wächst in das umgebende Knochengewebe des Kiefers ein. Auf dem oberen Ende werden Kronen oder Brücken verankert.

Heute nutzt man als Grundwerkstoff der Wurzel fast ausschließlich Titan, nur hinsichtlich der optimalen Oberflächengestaltung gibt es unterschiedliche Auffassungen. Je größer die Kontaktfläche mit dem Kiefer, desto inniger und fester wird die Verbindung. Die einfachste Vergrößerungs-Methode ist das Schraubengewinde. Manche Implantate sind auch mit Hydroxylapatit beschichtet. Dieses Material, das beispielsweise bei hochwertigen Hüftgelenksimplantaten verwendet wird, entspricht in der chemischen Zusammensetzung etwa dem Knochen und kann deshalb eine enge, chemische Verbindung mit ihm eingehen. Das Hydroxylapatit wird im Laufe der Zeit teilweise abgebaut und durch Knochen ersetzt. Neuere Wurzel-Typen vergrößern die Mikrooberfläche durch chemisches oder mechanisches Aufrauen des Titans selbst; man spricht dann von einer 3D-Struktur.

Jeder Verlust an Zähnen und Knochensubstanz erschwert aber auch eine Behandlung mit Implantaten. Die aktuelle Forschung konzentriert sich deshalb nicht mehr auf Fragen der Technik, sondern der Biologie: Wie kann man verloren gegangene Knochenmasse so weit wieder herstellen, dass ein Implantat Halt findet?

Die wichtigsten, schon genutzten Lösungen sind: Die Transplantation körpereigenen Knochens aus anderen Kieferbereichen, dem Hüftknochen oder Unterschenkelknochen; der Einsatz tierischen Materials; seit 1999 die Stimulierung der Knochenneubildung durch Wachstumsfaktoren, die von Rindern gewonnen wurden; das allmähliche Aufdehnen des verbliebenen Knochens, um dessen Volumen zu erhöhen. Neuerdings gelingt es auch, Wachstumsfaktoren durch Zentrifugieren aus Patientenblut anzureichern.

Mit den meisten der erwähnten Verfahren lassen sich zwar geradezu spektakuläre Erfolge erzielen, doch nur bei entsprechend großer Erfahrung. Enorme

Interview mit Dr. Fritz-Josef Willmes, Präsident der Bundeszahnärztekammer

„Die Zahnarztpraxis als reine Reparaturwerkstatt ist ein Auslaufmodell.“

INFO-Z

Kann es Zahngesundheit für jedermann geben? Der Präsident der Bundeszahnärztekammer scheint skeptisch.

Spektrum der Wissenschaft: *Es gibt viel Neues an zahnmedizinischer Technik für Diagnose und Therapie. Was hat Otto Normalverbraucher davon?*

Dr. Willmes: Er profitiert vom Zuwachs an Wissen, aber nicht immer von neuer Technik. Nicht jeder Zahnarzt kann deren ganzes Spektrum anbieten, denn die Anschaffung neuer Geräte geht ins Geld und muss sich rechnen. Doch 90 Prozent der Bundesbürger sind in der Gesetzlichen Krankenkasse versichert, und die kann für ihre Versicherten nur einen bestimmten Leistungskatalog anbieten – bei zusätzlicher Einschränkung durch die Budgetpolitik der Regierung. Zu diesem Katalog gehören weder das gesündere digitale Röntgen noch zahnfarbene Füllungen, noch Implantate. Das sind deshalb Privatleistungen. Das bedeutet: Grundversorgung für alle und weitergehende Leistungen als Wahlangebote bei privater Zuzahlung. Ein entsprechender Katalog ist in Arbeit.

Spektrum: *Angenommen, ich wäre bereit, für eine neue Technik selbst Geld hinzulegen, wie finde ich denn den Zahnarzt, der sie einsetzt?*

Willmes: Fast alle Zahnärztekammern haben Patientenberatungsstellen eingerichtet, viele führen Listen der auf bestimmte Behandlungen spezialisierten Ärzte. Angaben zu fachlicher Qualifizierung, Zertifizierungen und dergleichen erlauben Rückschlüsse auf die gesuchte Therapiemethode. Allerdings beruhen diese Einträge auf Selbstangaben der Zahnärzte.

Spektrum: *Ist eine Praxis mit fünf Jahre alter technischer Ausstattung überhaupt noch in der Lage, moderne Zahnheilkunde zu bieten?*

Willmes: Im Prinzip schon. Bei den meisten Maßnahmen zur Behandlung kariöser Defekte, in der zahnärztlichen Chirurgie und auch beim Zahnersatz spielt es in der Regel keine entscheidende Rolle, ob man mit den Möglichkeiten von vor fünf Jahren arbeiten muss. Neue Methoden sind aber oft schonender. Wenn zum Beispiel eine Ecke angebrochen ist, muss man eben nicht mehr den verbliebenen gesunden Zahn abschleifen



und eine Krone draufsetzen, sondern kann das fehlende Stück mit Komposit Schicht für Schicht wieder aufbauen.

Spektrum: *Wie steht es mit der Prophylaxe? Können die neuen Entwicklungen Zahn- und Munderkrankungen zurückdrängen?*

Willmes: Es sieht so aus. Die Statistik zeigt uns, dass die Zahngesundheit bei Kindern und Jugendlichen ganz deutlich besser geworden ist. Bei 12-Jährigen – eine international gebräuchliche Vergleichsgruppe – ist die Zahl der durch Karies geschädigten Zähne in den letzten zehn Jahren hier zu Lande von durchschnittlich 3,9 auf 1,6 zurückgegangen. Dahinter steht zum einen die verbesserte Mundhygiene als Ergebnis unserer Aufklärungsarbeit etwa in Kindergärten und Schulen. Dahinter stehen aber auch neue Produkte der Industrie als Ergebnis der Forschung. So gibt es seit einiger Zeit einen speziellen Kunststoff zum Verschließen feiner Rillen auf den Backenzähnen. Das reduziert Bakterienherde. Die Dritte Deutsche Mundgesundheitsstudie, die 1999 veröffentlicht wurde, weist nach, dass Kinder ohne solche Fissurenversiegelung durchschnittlich 2,2 von Karies betroffene Zähne hatten, behandelte Kinder hingegen nur 1,3. Auf diese Ergebnisse sind wir sehr stolz.

Spektrum: *Können nicht auch Erwachsene Sorgenkinder sein? Wie steht es denn mit deren Zahngesundheit?*

Willmes: Natürlich gibt es auch da Fortschritte. Jedes gut sitzende Implantat schützt den Kieferknochen vor möglicher Fehlbelastung. Von den gentechnischen Entwicklungen, die ja noch gar nicht in aller Tragweite abzusehen sind, gar nicht zu reden. So wird beispielsweise erforscht, wie man Kariesbakterien soweit verändern kann, dass sie keine Säuren mehr produzieren.

Spektrum: *Immer bessere Prophylaxe, medizinischer Fortschritt – wie sehen Sie die Zukunft Ihres Berufsstandes?*

Willmes: Die Zahnarztpraxis als reine Reparaturwerkstatt ist ein Auslaufmodell. Wir werden noch mehr als heute schon Ansprechpartner „rund um den Mund“ sein, die Patienten begleiten und beraten. Allerdings wird der Umfang solcher Leistungen stark davon abhängen, dass Zahngesundheit für jedermann von der Politik auch wirklich gewollt wird.

Die Fragen stellte die Berliner Medizinjournalistin **Birgit Dohlus.**

Forschungsanstrengungen sind noch vonnöten, um die Verfahren zu standardisieren und als Regelangebot in den Praxen einzuführen.

Bleibt die Frage nach den Kosten. Ein Implantat mit Krone beläuft sich je nach Aufwand auf 3000 bis 6000 Mark. Bei kleineren Behandlungen ist das damit kaum teurer als konventionelle Kronen. Anders aber bei umfangreichen Rekonstruktionen. Der Extremfall – eine herausnehmbare Totalprothese – kostet 1000 bis 8000 Mark, eine Totalimplantation – bei der fast immer auch ein Kieferaufbau notwendig ist – etwa 30000 bis 150000 Mark. Zahnlosigkeit lässt sich unter den Vorgaben einer Sozialversicherung damit wohl nicht beheben. Mit der größeren Verbreitung – 1998 wurden in Deutschland immerhin etwa 190000 Zahnimplantate eingesetzt – dürfte sich der hohe Preis etwas reduzieren.

Dennoch glaube ich, dass die Implantologie im Verein mit einer Wiederherstellung des Kieferknochens immer mehr in den Industrieländern zur Standardlösung bei Zahnverlust werden wird – sie entspricht einfach am ehesten den natürlichen Verhältnissen gesunder Zähne. Aus finanziellen, manchmal auch aus praktischen Gründen werden aber konventionelle Brücken und Kronen weiter existieren. Zu wünschen wäre, dass durch eine Verbesserung der Prävention Zahnverlust immer seltener vorkommt oder zumindest nur noch einzelne Zähne ersetzt werden müssen statt ganzer Zahngruppen. ■

Peter A. Ehrl *studierte Medizin und Zahnmedizin. Er arbeitet als niedergelassener Arzt und Zahnarzt für Oralchirurgie. Ehrl ist Gutachter für Implantologie und forschender Implantologe.*



PARODONTITIS

Das schleichende Übel

Patienten im mittleren Alter verlieren Zähne eher durch Parodontitis als infolge von Karies. Denn oft wird die Krankheit zu spät erkannt.

Von Peter Purucker

Es beginnt ganz harmlos mit ein wenig Zahnfleischbluten beim Zähneputzen. Ohne gute Mundhygiene bilden sich im Laufe von etwa zwanzig Jahren Zahnfleischtaschen, ohne dass der Patient dies wahrnimmt. Häufig schwindet dann auch das Zahnfleisch und die empfindlichen Zahnhälse liegen mehr und mehr frei. Im fortgeschrittenen Stadium beginnen schließlich die Zähne zu wackeln, und manchmal wandern sie sogar einige Millimeter zur Seite oder nach vorne. Am Schluss fallen sie aus oder müssen gezogen werden.

Dieser Prozess der Parodontitis, fälschlicherweise meist „Parodontose“ genannt, kostet Menschen im mittleren Alter mehr Zähne als die eher beachtete Karies. Dabei ist diese Entzündung des Zahnhalteapparates (fachlich „Parodont“) im frühen Stadium sehr leicht zu behandeln, in späteren allerdings nur mit erheblichem Aufwand.

Ursache ist ein bakterieller Belag, der sich auf der Oberfläche der Zahnwurzel, also unterhalb des Zahnfleischrandes bei schlechter Mundhygiene ausbildet. Insbesondere regelmäßiges Reinigen der Zahnzwischenräume kann dem entgegensteuern.

Diese Mikroorganismen produzieren Enzyme und Giftstoffe, die wiederum die bindegewebeartige Wurzelhaut angreifen, die ein elastisches Kissen um die Wurzel bildet und mit Kollagenfasern den Zahn im Kieferknochen verankert. Zudem „verkalkt“ der Biofilm auf der Seite der Zahnwurzel zu Zahnstein, dessen raue, zerklüftete Oberfläche weiteren Bakterien das Anheften und Bewachsen erleichtert.

Auch das Zahnfleisch ist durch Bindegewebsfasern mit dem Zahnhals verbunden. Die Lockerung dieser Struktur bringt eine Tasche hervor, in der sich nun die weitere Entzündung abspielt. Das Immunsystem versucht, die Infektion in den Griff zu bekommen, und sei es durch Opfern des Zahns, also weiteren Abbau des Halteapparates. Wie sinnvoll dieses Vorgehen ist, zeigen medizinische Studien der letzten zehn Jahre. Die relativ große Wundfläche der Infektionsherde wirkt nämlich auf den gesamten Organismus und fördert beispielsweise Herz-Kreislauferkrankungen; Schwangere mit unbehandelter Parodontitis gebären häufiger untergewichtige Kinder als gesunde.

Behandlung tut also Not, zumal auch der Kieferknochen durch wiederholte Entzündungen Substanz verlieren kann – daher das Wandern von Zähnen. Die Devise lautet schlicht: Entfernen von Biofilm und Zahnstein, damit der Halteapparat, unterstützt durch sorgfältige Mundhygiene und Nachsorge, ausheilt.

Wer im frühen Stadium der Erkrankung den Arzt aufsucht, kommt mit einem „minimal-invasiven“ Eingriff davon: Unter örtlicher Betäubung nutzt der Therapeut die Zahntasche als Eingang, um den Biofilm und Zahnstein mit so genannten Küretten zu entfernen. Das sind schmale scharfe Löffel, mit denen der Zahnstein „weggekratzt“ und die Wurzel schabend gereinigt wird. In schwereren Fällen muss er das Zahnfleisch von der Wurzel ablösen, zurückklappen und nach der Reinigung wieder festnähen. Etwa 95 Prozent der Fälle lassen sich so erfolgreich behandeln. Die restlichen fünf Prozent benötigen noch aufwendigere Techniken.

Den sehr fest haftenden Zahnstein mit der Kürette zu entfernen, kostet einiges an Kraft. Deshalb kamen 1955 Ultraschallscaler auf den Markt. Sie sollten den Belag durch Vibrationen zertrümmern. Elektrisch angetrieben schwingt eine schlanke konische Spitze 25000- bis 40000-mal pro Sekunde. Diese Geräte wurden in den letzten Jahren weiterentwickelt, jedoch ist auch mit neueren nur im oberen Taschenbereich die vollständige Zahnsteinentfernung möglich.

Nachteil dieser Geräte ist, dass die hohen Frequenz von den Patienten als eher unangenehm empfunden werden und dass sich die Spitze stark erwärmt. Dem wirkt eine Wasserspraykühlung entgegen, doch der Spraynebel (fachlich Aerosol) kann Bakterien in der Raumluft verteilen, sodass eine gute Luftabsaugung durch die Zahnarzthelferin erforderlich ist. Als weiteres Gerät zu mechanischen Zahnsteinentfernung durch Vibrationen sind Airscaler im Gebrauch, die mit niedrigeren Frequenzen um 3000 bis 6000 Schwingungen pro Sekunde (Hertz) arbeiten. Diese werden pneumatisch, ähnlich wie eine Zahnarztturbine angetrieben. Die Vor- und Nachteile sind mit den Ultraschallgeräten vergleichbar.

Bei fortgeschrittener Erkrankung muss bei beiden Systemen das Zahnfleisch weggeklappt werden, um den Zahnstein erreichen zu können. Problematisch erweisen sich insbesondere die schwer zugänglichen Mehrfachwurzeln von Backenzähnen. Dafür werden seit 1988 Airscaler mit Arbeitsspitzen verwendet, die mehrfach abgewinkelt sind und eine diamantierte verdickte Spitze zur gezielten Wurzelbearbeitung besitzen. Ein neuartiger Ultraschallscaler mit linear schwingender Arbeitsspitze und geringerer Wärmeentwicklung wurde an der Universität Tübingen entwickelt.

Der Wunschtraum wäre natürlich ein Scaler, der den Zahnstein geräuschlos ohne jeden mechanischen Druck und



PROF. MEYLE / DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR PARODONTOLOGIE

Gesundes Zahnfleisch ist blass-rosa und füllt die Zwischenräume zwischen den Zähnen (oben), bei einer Parodontitis wirkt es hingegen gerötet und leicht geschwollen, die Zwischenräume liegen frei (unten). Bei diesem Patienten sind die Zähne bereits gelockert und der knöcherne Unterbau teilweise verloren.

Der Zahn – harte Schale, weicher Kern

Der Zahnschmelz umgibt das Zahnbein im Kronenbereich

Das Zahnbein (Dentin) bildet die Hauptmasse

Im Zahnmark (Pulpa) verlaufen Nerven und Blutgefäße

Das Zahnfleisch (Gingiva) schützt den Halteapparat

Der Zahnhalteapparat besteht aus zwei Anteilen: Knochenartiger Zement umgibt das Dentin im Wurzelbereich, Wurzelhaut verbindet den Zahn elastisch mit dem Kiefer.

Der Kieferknochen bildet das Zahnfach (Alveole), in dem die Zahnwurzel verankert ist

Durch den Wurzelkanal ziehen Nerven und Blutgefäße zur Pulpa

Zahnkrone

Zahnhals

Zahnwurzel

Acht Schneide- und vier Eckzähne schneiden, durchstoßen und zerreißen unsere Nahrung, 16 Backenzähne zermahlen sie zu Brei. Im Laufe des Lebens bewältigen die natürlichen Zähne beziehungsweise ihr Ersatz nicht weniger als 20 Tonnen an Speisen. Dazu sind sie wie ein Verbundwerkstoff aus harten Materialien aufgebaut und fest, doch gleichzeitig elastisch im Kieferknochen verankert.

Das Zahnbein (Dentin) bildet den Löwenanteil des Zahns und wird von speziellen Zellen in dem so genannten Zahnmark (Pulpa) in gewissem Maße immer wieder erneuert.

In feinen Kanälchen durchziehen Nervenfasern vom Mark ausgehend das Zahnbein. Werden sie gereizt, etwa wenn Karies das Dentin angreift oder an frei liegenden Zahnhälsen, senden sie Schmerzsignale. Dann sollte der Gang zum Zahnarzt nicht weiter aufgeschoben werden.

QUELLE: GESUNDHEIT, WORT & BILD VERLAG, APRIL 2000.

INFOGRAFIK: MEDICAL ART SERVICE

möglichst selektiv abträgt. Seit etwa 1990 sind entsprechende Lasersysteme in der Erprobung. Durch eine Heranführung des Laserlichtes über keilförmige Lichtleiter an die Wurzeloberfläche lässt sich auch tief liegender Zahnstein erreichen. Nur die innersten Wurzelbereiche großer Backenzähne bereiten auch hier noch Probleme. Lichtpulse aus einem Erbium-YAG-Laser, die im Wasser des Zahnsteins stark absorbiert werden, bringen den Zahnstein sozusagen zur Explosion, und zwar bei richtiger Anwendung ohne die darunter liegende Wurzel stark zu beschädigen. Es werden nur geringe Rauigkeiten erzeugt, die für die Heilung nicht von Nachteil sind. Langzeitstudien stehen aber noch aus.

Alle technischen Raffinessen können aber nur eines: Den akuten Prozess stoppen. Ein erneutes Aufflammen muss die regelmäßige Nachsorge und die tägliche Mundhygiene des Patienten verhindern. Die Nachsorge wird in der Schweiz seit fast dreißig Jahren durch speziell ausgebildete zahnärztliche Fachhelferinnen, so genannte Dentalhygienikerinnen, durchgeführt. In Deutschland oder Österreich sind diese für die Behandlung unersetzlichen Fachkräfte leider nur vereinzelt in den Praxen tätig (in Deutschland weniger als hundert). Das Wichtigste für den Langzeiterfolg der Behandlung ist jedoch die tägliche Reinigung der Zahnzwischenräume durch den Patienten und hier zählen Deutschland und Österreich noch zu den Entwicklungsländern. ■

Peter Purucker *ist Oberarzt der Abteilung Parodontologie und synoptische Zahnmedizin am Universitätsklinikum Charité der Humboldt-Universität zu Berlin.*



RESTAURATIONSTECHNIK

Der Zahnarzt als Restaurator: Modellieren mit Kompositen

Direkte Kunststoffaufbauten eignen sich oft als Alternative zu laborgefertigten Überkronungen und Inlays. Ihre Vorteile: weniger Materialabtrag, geringere Kosten.

Von Hans Jörg Staehle

Zum Weltmeister im Verbrauch von Zahngold geriet die Bundesrepublik Deutschland, als vor etwa dreißig Jahren der „Prothetik-Boom“ einsetzte. Kronen waren gefragt, Schäden vorbeugen und Substanz erhalten zweitrangig. Doch inzwischen findet ein Umdenken statt. Dazu wurden Präparationstechniken für sehr gezielte Eingriffe in den letzten Jahren immer mehr verfeinert. Zahnhartsubstanzen werden meist entweder mit Hilfe schleifender oder schneidender Instrumente auf Diamant- oder Hartmetallbasis mechanisch abgetragen. Hinzu kommen für bestimmte Einsatzgebiete Partikelstrahler, deren Anwendung im Grunde dem Sandstrahlen von Gebäuden vergleichbar ist. Es gibt auch Gele, die karies-befallene Substanz chemisch auflösen, sowie spezielle Lasersysteme. Die hohen Erwartungen an die letzten beiden Verfahren haben sich aber bislang nicht erfüllt. Deutlicher reduzieren neue Instrumentenformen und präzise rotierende beziehungsweise oszillierende Geräte zum gezielten Materialabtrag die Belastungen beim „Bohren“. Außerdem gibt es heute bessere, plastisch verarbeitbare Materialien, die sozusagen das Anfertigen von Zahnersatz direkt im Mund des Patienten erlauben; der Schritt ins Labor entfällt.





ALLE FOTOS: HANS JÖRG STAEHLE

Fehlende Schneidezähne hinterließen bei diesem Patienten (oben) unschöne Lücken. Deshalb wurden die vorhandenen Zähne mit direkt aufgetragenem, zahnfarbenem Komposit-Material etwas verbreitert und verlängert (unten).

Meist sind die Materialien Verbundwerkstoffe, auch Komposite genannt, aus einer organischen Grundsubstanz und anorganischen Füllstoffen. Erstere macht etwa ein Fünftel der Masse aus und besteht meist aus Acrylatkunststoffen oder so genannten Siloxanen. Den überwiegenden anorganischen Anteil bilden beispielsweise winzige Glaspartikel von weniger als einem tausendstel Millimeter Durchmesser; eine dünne Beschichtung sorgt für ihren innigen Verbund zum Kunststoff.

Bis vor wenigen Jahren eigneten sich solche Komposite hauptsächlich zur Versorgung kleinerer und mittlerer Zahnschäden, insbesondere um Defekte in mechanisch wenig belasteten Zahnbereichen zu schließen. Mittlerweile sind sie sehr viel verschleißfester geworden. Auch gibt es bessere Techniken, die Verbindung mit den Zahnhartsubstanzen stabil zu machen. So hat sich ihr Anwendungsbereich rasch vergrößert und umfasst beispielsweise

- die langfristige Versiegelung von gefährdeten Einkerbungen im Zahnschmelz (so genannten Fissuren und Grübchen) im Rahmen der Kariesvorbeugung;
- die dauerhafte Versorgung von Schäden (zum Beispiel infolge Karies) im Front- und Seitenzahnbereich;
- Korrekturen von Farbe oder Form von Zähnen, etwa um Lücken zu schließen;





Ein Zahnhöcker ist von einem mit einem Metall-Inlay versorgten kleinen Backenzahn abgebrochen (oben). Der entstandene Defekt wurde mit einem zahnfarbenen Komposit direkt im Mund des Patienten repariert (unten).

- Reparaturen an bereits vorhandenen, mittlerweile schadhaft gewordenen Restaurationen;
- das Schienen verletzter Zähne,
- ja sogar Ecken-, Höcker- und Kronenaufbauten von Einzelzähnen.

Der Zahnarzt hat somit heute mehr Behandlungsmöglichkeiten bei Zahnschäden als noch vor wenigen Jahren. Er kann bei ein- und demselben Defekt direkt versorgen wie auch eine indirekte, laborgefertigte Restauration vornehmen. Beide Methoden haben ihre Vor- und Nachteile, Patient und Arzt müssen gemeinsam den Einzelfall abwägen.

Die herkömmliche, indirekte Restauration kann schwierige Arbeitsgänge ins Labor verlagern und auf sehr bewährte Techniken zurückgreifen. Dafür ist sie aber oft mit einem erheblichen Verlust an natürlicher Zahnsubstanz und hohem Aufwand verbunden. In diesen beiden Punkten siegt die direkte Restauration mit Kompositen. Viele Zwischenschritte der Herstellung entfallen, angefangen von der Abformung präparierter Zähne über die Herstellung von Modellen und Provisorien bis hin zur Anfertigung der Werkstücke im Labor. Direkt eingebrachte zahnfarbene Restaurationen sind zwar deutlich teurer als zum Beispiel Amalgamfüllungen, aber immer noch kostengünstiger als etwa Inlays oder Überkronungen.

Von Nachteil ist allerdings die hohe Empfindlichkeit gegenüber Verarbei-

tungsfehlern. Schwierige Arbeitsgänge, die früher in das Techniklabor verlegt wurden, erfolgen direkt im Mund des Patienten. Das Arbeitsfeld muss vor allem übersichtlich und trocken sein, besonders bei schwer zugänglichen Bereichen oder gar unter das Zahnfleisch reichenden Defekten keine leicht zu erfüllende Forderung. Die bisherigen Erfahrungen zeigen aber, dass Kompositrestaurationen unter günstigen Voraussetzungen ihre Funktion jahrelang erfüllen können, Langzeiterfahrungen liegen aber kaum vor.

Hinsichtlich der gesundheitlichen Verträglichkeit ist es nach aktuellem Wissensstand medizinisch vertretbar, sämtliche der heute gebräuchlichen Restaurationsmaterialien wie Komposite, Keramiken und Gussmetalle am Menschen einzusetzen. Dies gilt auch für die in den letzten Jahren oft zu Unrecht attackierten Amalgame. Unverträglichkeitserscheinungen wie etwa Allergien sind insgesamt sehr selten und können durch nahezu alle zahnärztlichen Restaurationen hervorgerufen werden.

Ob eine Versorgung von Dauer ist oder nicht, entscheidet auch der Patient durch seine Hygiene. Insbesondere solche Areale bedürfen besonderer Sauberkeit, die als Nischen für bakterienhaltige Beläge in Frage kommen. Dazu zählen zum Beispiel die Zahnzwischenräume, die mit Zahnseiden oder speziellen Bürsten erreicht werden. Eine ausgewogene Ernährung und ausreichende Fluoridzufuhr tragen das ihre dazu bei, die im Lauf des Lebens eingebrachten zahnärztlichen Restaurationen bis ins hohe Alter ästhetisch ansprechend und funktionsfähig zu erhalten. ■



***Hans Jörg Staehle** studierte Zahn- und Humanmedizin. Er wurde 1990 Ordinarius und Ärztlicher Direktor der Poliklinik für Zahnerhaltungskunde an der Universität Heidelberg. Staehle ist seit 1997 Sprecher der Deutschen Hochschullehrer für Zahnerhaltung.*

Ästhetik der Frontzähne

Hollywood-Lächeln für jedermann?

Schöne Menschen haben schöne Zähne, glaubt man Fernsehen und Printmedien. Die Wirklichkeit sieht meist anders aus: 20 bis 40 Prozent der Niederländer beklagen, einer Studie zufolge, das Erscheinungsbild ihrer Frontzähne; etwa ein Drittel der täglichen Zahnbehandlungen in amerikanischen Praxen betreffen ästhetische Korrekturen.

Deren Bedeutung diskutieren Zahnmediziner seit den 30er Jahren. Damals kam das berühmte Hollywood-Lächeln auf, das dem Publikum Schönheit und Jugend vortäuschte. In Wirklichkeit bestand es aus dünnen Keramikschalen, die während der Dreharbeiten mit Prothesenhaftpulver vorübergehend befestigt wurden. Heute lässt sich dergleichen dauerhaft anbringen: Die Innenseite der meist weniger als einen Millimeter starken Verblendungen wird ebenso wie die Zahnoberfläche vorbehandelt und beides dann mit Kompositkunststoffen dauerhaft verbunden. Ein ausgefeilter Schichtaufbau und spezielle Farben geben ein natürliches Aussehen.

Alternativ dazu kann der Arzt Kunststoffverblendungen auch direkt im Mund fertigen – oder ,besser gesagt, modellieren. Der Vorteil: Die Oberfläche des gesunden Zahns muss lediglich aufgeraut, nicht beschliffen werden. Schließlich gibt es natürlich auch die Möglichkeit, im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen Überkronungen oder Implantate zu erwerben, die dem Mund ein angenehmeres Aussehen vermitteln.

Denn Zähne, Lippen und angrenzende Gesichtsregion müssen ein „geschlossenes Ganzes“ bilden, um schön zu wirken. Disharmonien im Linienverlauf hingegen stören den Eindruck, den ein Lächeln hinterlassen sollte. Bestimmte Proportionen wie das Breite-Längen-Verhältnis der Zähne oder ihre Größenbeziehungen untereinander werden als angenehm empfunden, wenn sie dem „Goldenen Schnitt“ nahe kommen. Doch Achtung: eine natürliche „Frontzahn-Komposition“ erfordert subtile Variationen, um nicht künstlich zu wirken. Deshalb dürfen und sollen beispielsweise die mittleren Schneidezähne durch Größe, Form oder Farbe im Frontzahnbogen dominieren.

Burkhard Hugo

Der Autor arbeitet als Oberarzt an der Klinik für Zahnerhaltung und Parodontologie der Universität Würzburg.

INTERTOPICS





Die natürliche Zahnlinie der Sängerin Cher entsprach nicht den Kriterien der Ästhetik. Heute zeigt sie ein Hollywood-Lächeln dank der Errungenschaften moderner Zahnmedizin.

STEINZEITLICHE FELSKUNST

Jäger, Schamanen, Künstler

Über den Ursprung der menschlichen Kunst in der Steinzeit informiert eine Wanderausstellung. Sie zeigt unter anderem die ältesten „Bilder" der Menschheitsgeschichte.

Von Uwe Reichert

Sie sind in Höhlen, auf Felswänden, auf Findlingen und auf flachen Felsoberflächen zu finden: Darstellungen von Menschen und Tieren, ausgeführt von unbekannten steinzeitlichen Künstlern. Die angewandten Herstellungstechniken sind so vielfältig wie die gezeigten Motive und die Kulturkreise, in denen sie entstanden. Mal wurden die Bilder mit den Fingern oder mit Pinseln aus den Schwanzhaaren kleiner Tiere gemalt, mal wurde die Farbe durch ein Röhrchen geblasen oder einfach aufgespuckt. Andere prähistorische Künstler nutzten Steinhämmer oder -messer, um die Symbole in glatte Felsoberflächen zu meißeln oder zu ritzen.

Was dem modernen Betrachter wie eine primitive Kritzelei erscheinen mag, wurde vor Jahrtausenden mit hoher Präzision gefertigt. Vor allem der einzigartige Symbolgehalt der Bilder ist für die Forschung von großer Bedeutung. Anders als Steinwerkzeuge oder Reste von Wohnstätten, die den Archäologen Rückschlüsse auf die handwerklichen Fertigkeiten und das Umfeld früherer Kulturen erlauben, liefern die Felsmalereien nämlich auch Einblicke in die Vorstellungswelt unserer Vorfahren. Während manche Bilder Szenen aus dem Alltag oder von der Jagd darstellen, zeigen viele offenbar religiöse Riten und Zeremonien.

Zahlreiche Malereien und Ritzungen sind gewiss auch während der Durchführung von Ritualen entstanden – dies ergibt sich allein schon aus der Besonderheit mancher Fundorte und aus der großen Anzahl der Bilder. Die Felsritzungen in Alta (Nordnorwegen) zum Beispiel bedecken ein Areal von mehreren tausend Quadratmetern. Die ältesten Gravuren dort entstanden vor mehr als 6000 Jahren; die jüngsten sind etwa 2500 Jahre alt. Etwa 200 Generationen haben also an dieser Stelle Figuren und Szenen in den Fels geritzt. Aus den Veränderungen, die im Laufe der Zeit an den Motiven und deren Komposition auftraten, können Wissenschaftler darauf schließen, wie sich die Weltanschauung der dort lebenden Völker gewandelt hat.

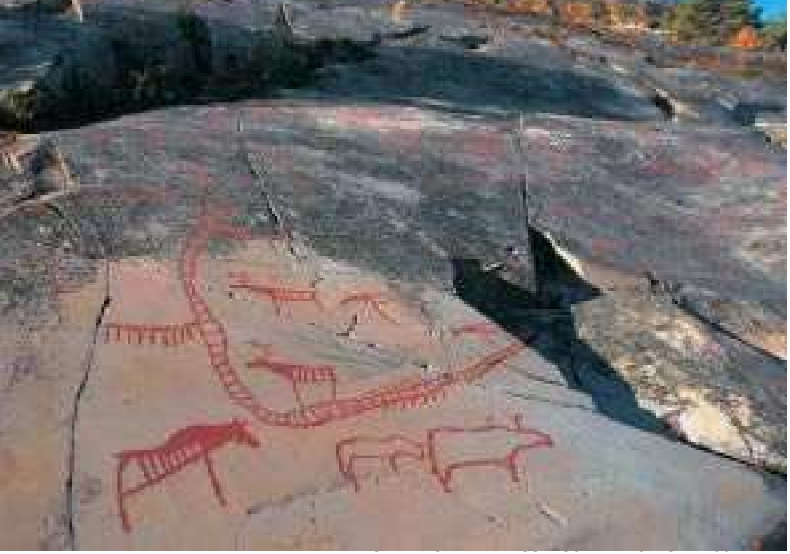
Die ältesten bekannten Felsmalereien entstanden vor ungefähr 30 000 Jahren, in einer Zeit, als der moderne Mensch den Neandertaler in Europa verdrängte. Die künstlerische Tätigkeit kam also relativ spät in der Entwicklung des Menschen auf. Der Neandertaler und andere Frühmenschen haben sicherlich ebenfalls über hoch entwickelte geistige, soziale und handwerkliche Fähigkeiten verfügt. Das symbolische und kreative Denken, wie es für die darstellende und abstrakte Kunst erforderlich ist, scheint aber ein Merkmal des modernen Menschen, des *Homo sapiens sapiens*, zu sein.

Irgendwann vor einigen zehntausend Jahren muss das menschliche Gehirn einen gewaltigen Evolutionssprung vollzogen haben, der eine neue Fähigkeit mit sich brachte, die man als gedankliche Beweglichkeit bezeichnen kann. Der moderne Mensch vermochte damit die Denkweisen und Wissensbereiche, die bei seinen Vorläufern noch klar getrennt waren, frei zu integrieren und zu kombinieren. Dies gab ihm die Möglichkeit, sich in Metaphern und Analogien auszudrücken, was die Grundlage für Religion, Kunst und schließlich auch Wissenschaft bildete. Diese bemerkenswerte kulturelle Weiterentwicklung ist eng mit der Ausbreitung des modernen Menschen über alle Teile der Welt und mit dem Aussterben anderer Menschentypen verbunden.



UNITED EXHIBITS GROUP

Die Ausstellung „Mensch" ist im Niederösterreichischen Landesmuseum in St. Pölten bis zum 11. Februar zu sehen (täglich von 10 bis 18 Uhr). Anschließend wird sie in zahlreichen europäischen Städten gezeigt.



UNITED EXHIBITS GROUP

Zwei Beispiele für steinzeitliche Kunst: Die „Great Gallery" im Osten von Utah besteht aus roten Malereien an den Felswänden des Hufeisen-Canyons (oben); die menschenähnlichen, ohne Arme und Beine dargestellten Figuren erinnern an Geister. Die Felsritzungen im nordnorwegischen Alta enthalten die ältesten Darstellungen von Gattern zur Rentierjagd (rechts).

Über die geistigen Entwicklungsschritte des Menschen, wie sie sich in den jahrtausendealten Felsmalereien widerspiegeln, informiert die Ausstellung „Mensch: Jäger, Schamane, Künstler“, die zur Zeit in St. Pölten (Niederösterreich) und anschließend auch in anderen Städten Europas zu sehen ist. Einige der weltweit zu findenden prähistorischen Felsbilder sind in großen Dioramen nachgebildet: Chauvet und Lascaux (Frankreich), Alta (Norwegen), Huashan (China), Kakadu (Australien), Great Gallery (USA) und Drakensberg (Südafrika). Interaktive Spiele und Medienstationen ermöglichen es den Besuchern, die Entwicklungslinie vom Steinzeit- zum heutigen Menschen nachzuzeichnen. Ergänzt wird die kulturhistorische Ausstellung durch Originalexponate wie Kultfiguren, Trommeln, Jagdwerkzeuge und Kleidungsstücke von Schamanen. ■

Uwe Reichert ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

KULTURELLER AUSTAUSCH

Zwischen Orient und Okzident

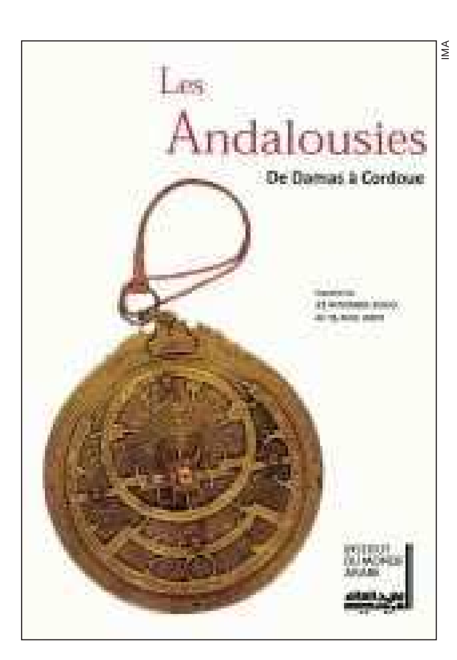
Das „Institut du Monde Arabe“ in Paris trägt mit seiner Konzeption zum interkulturellen Dialog zwischen den europäischen und den arabischen Ländern bei.

Von Anat-Katharina Kálmán

Als die westliche Welt 1974 in die erste Ölkrise schlitterte, schlug der damalige französische Staatspräsident Valéry Giscard d’Estaing vor, eine Institution zur Verbesserung der Beziehungen zwischen Europa und den arabischen Ländern einzurichten. Er dachte dabei an einen Ort des intellektuellen Austausches, an eine Art euro-arabischer Akademie der Wissenschaften. Dass daraus dann das „Institut du Monde Arabe“ – kurz IMA genannt – wurde, ist jedoch seinem Nachfolger François Mitterrand zu verdanken, der diese Idee Mitte der achtziger Jahre wieder aufgriff. Eröffnet wurde dieses Kulturinstitut mit Sitz in Paris schließlich im Jahre 1987.

Zu jenem Zeitpunkt stand freilich noch nicht fest, wie die einzelnen, zunächst disparat erscheinenden wissenschaftlichen und künstlerischen Bereiche zusammenwirken sollten. „Das alles hat sich erst im Laufe der Zeit aus der praktischen Erfahrung heraus entwickelt“, erläutert Brahim Alaoui, der Direktor des IMA. Heute ist das Institut einzigartig in der ganzen Welt. Es möchte die kulturelle Vielfalt der gesamtarabischen Geschichte in die breite Öffentlichkeit tragen und bedient sich dazu einer vielfältigen Palette an Mitteln: Forschung, Bibliothek, Mediathek, Ausstellungen, Jugendateliers und Musikveranstaltungen.

Das IMA will unter anderem bewusst machen, dass die arabische Welt nicht ausschließlich eine islamische ist, sondern eine Fülle an Religionen und Kulturen beherbergt. Zudem beleuchtet es immer wieder die engen literarischen, philosophischen und wissenschaftlichen Verbindungen zwischen dem christlichen Europa des Mittelalters und der arabischen Welt Nordafrikas. „Allein die Renaissance hätte es nicht gegeben, ohne den intensiven islamisch-jüdisch-christlichen Austausch im maurischen Andalusien“, hebt Alaoui hervor. Aber auch in der Gegenwart möchte der Institutsleiter die Verbindungen zwischen der abendländischen und der orientalischen Welt fördern. Sein Programm richtet sich deshalb nicht nur an ein allgemeines Publikum, sondern auch an die in Frankreich lebenden 15 Millionen Maghrebiner. „Wir wollen den jungen entwurzelten *beurre*s in den Pariser Vorort-Wohnsilos zeigen, dass die arabische Welt nicht irgendeine unterentwickelte Dritte Welt ist, sondern eine große Zivilisation.“



IMA

Die Wurzeln der andalusischen Kultur werden durch eine Ausstellung im Institut du Monde Arabe in ein neues Licht gerückt.

Mit spezifischen Kinder- und Jugendprogrammen möchte IMA alle Jugendlichen ansprechen. So genannte „Ateliers“ führen ganze Schulklassen in das Reich des Orients. „Und dort werden genau die Kinder zur geistigen Quelle, die sonst auf Grund ihrer maghrebinischen oder sudanesischen Herkunft scheinbar die Benachteiligten sind“, erklärt Anita Dolfus, die Leiterin der pädagogischen Abteilung. „Denn hier erklären sie ihren Schulkameraden die Buchstaben ihres Alphabets, die Bedeutung ihrer Symbole oder etwa die Qualität ihrer Stoffe. Und die anderen verstehen mit einem Mal, dass auch dieses Kind Träger einer Kultur ist. Das ändert dann oft vieles in der Beziehung der Kinder untereinander.“

Knotenpunkt des wissenschaftlichen Austauschs

Eine permanente Ausstellung bietet eine allgemeine Einführung in die Geschichte der arabischen Länder. Ansonsten arbeitet das IMA vor allem thematisch. Jeweils mehrere Monate lang sind alle Veranstaltungen einem bestimmten Land oder einer bestimmten Epoche gewidmet. Mehrere große Ausstellungen – wie zum Beispiel über den Jemen und den Sudan – wurden anschließend auch in anderen Weltstädten innerhalb und außerhalb Europas gezeigt. Für Alaoui ist es jedes Mal „ein Abenteuer, die Ausstellungsobjekte aus solchen Ländern wie etwa dem Jemen nach Europa zu holen, denn das heißt, mit den lokalen Behörden der kleinen Museen zu verhandeln, ihre Sprache zu sprechen und ihre Mentalitäten zu kennen.“

Die jeweiligen Ausstellungen werden thematisch von wissenschaftlichen Vorträgen und Diskussionsabenden zu Fragen der jeweiligen Politik, der Kultur, der Geographie und der Geschichte begleitet. Ein Teil der Referenten und Künstler ▶

kommt aus den jeweils vorgestellten Ländern. Um das wissenschaftliche Niveau zu gewährleisten, hat das IMA einen eigenen Lehrstuhl für themenspezifische Gastprofessuren eingerichtet, „der zum Knotenpunkt zwischen arabischen und französischen Wissenschaftlern wird“, so Philippe Cardinal, der Direktor für Kommunikation. Deshalb ist das IMA heute der einzige Ort in ganz Europa, an dem die namhaftesten arabischen Wissenschaftler und Intellektuellen aufeinander treffen – so etwa der Ägypter Ahmed Zewail, Chemie-Nobelpreisträger des Jahres 1999, und Khair El Dine Hassab vom Studienzentrum für die arabische Einheit in Beirut.

In der umfangreichen Bibliothek des IMA mit mehr als 65 000 Bänden sind drei wertvolle ehemalige Privatsammlungen enthalten, die so genannten „Fonds“. Der Fonds des französischen Arztes Bernard Ninard umfasst 2500 Werke in arabischer und französischer Sprache, seltene Lithographien, Zeichnungen und Skripte, die sich ausschließlich auf Marokko beziehen. Der syrische Fonds Qualagi enthält über 1000 seltene arabische Werke, die sich mit der Problematik der arabischen Nationalismen befassen. Der ägyptische Fonds Sayyid schließlich birgt 1800 Titel der arabischen Klassiker aus Literatur, Philosophie und Geschichte. Auf Grund des großen Interesses für arabische Literatur organisiert das IMA alle zwei Jahre eine „euro-arabische Buchmesse“, auf der 1999 Marokko das Gastland gewesen war.

Das Institut zählt mittlerweile 300 000 Besucher pro Jahr. Vierzig Prozent seines Budgets muss es selbst erwirtschaften – hauptsächlich durch die Einnahmen der Ausstellungen und der hauseigenen Buchhandlung. Unterstützt wird das IMA vom französischen Staat und von der arabischen Liga. Die steigenden Einnahmen und die ansehnlichen Besucherzahlen sind für Alaoui aber vor allem ein Zeichen dafür, dass ihm und seinen Kollegen etwas ganz Wichtiges gelungen ist: die Öffnung hin zu einem interkulturellen Dialog zwischen Orient und Okzident. ■

UWE REICHERT

Arabische Gelehrte des Mittelalters – hier der Mathematiker Abu l-Wafa al-Busdjani – haben die kulturelle Entwicklung Europas maßgeblich geprägt.

Anat-Katharina Kálmán lebt als freie Publizistin in Paris und Budapest.

WISSENSCHAFTSORGANISATIONEN

Revolution in der Forschungslandschaft

Der Wissenschaftsrat will, dass die Leibniz- und die Helmholtz-Gemeinschaft effektiver arbeiten. Inhalte gewinnen an Bedeutung, Einzelinteressen von Geldgebern und Egoismen der Institute werden zurückgedrängt.

Von G. Hartmut Altenmüller

Bund und Länder werden künftig weniger in die inhaltlichen Details der wissenschaftlichen Einrichtungen hineinregieren können. Deren Steuerung wird der Selbstverwaltung der Forschungsorganisationen anvertraut.

Freilich sind die einzelnen Institute der Forschungsorganisationen noch immer zu sehr in sich selbst versponnen. In Verhandlungen mit dem politischen Geldgeber wollen sie eher ihren Bestand als ihre wissenschaftliche Qualität sichern. Es fällt ihnen schwer, Teile von „erworbenen“ Aufgaben an andere Einrichtungen abzugeben oder einzelne Abteilungen ganz zu schließen, um durch Konzentration und Kooperation effizienter zu forschen. Die Leitungen der Organisationen, insbesondere der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF), mögen das oft deutlich sehen – bei den eigensüchtigen Instituten können sie sich aber nur schwer durchsetzen.

Mit dem Segen des Wissenschaftsrats machen sich nun die HGF und die Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz (WGL) daran, ihre Forschungsarbeit neu zu strukturieren. In seinen „Thesen zur künftigen Entwicklung des Wissenschaftssystems in Deutschland“ hatte das zentrale deutsche Wissenschaftsgremium im Juni 2000 die Basis für die jetzt fälligen Systemevaluationen dieser beiden Forschungsorganisationen gelegt.

Die zusammenfassende Bewertung zu den Einrichtungen der „Blauen Liste“ erläuterte der Vorsitzende des Wissenschaftsrates, Winfried Schulze, im November in Bonn. Vor drei Jahren hatten sich 78 der 84 Institute zur WGL zusammengeschlossen (Spektrum der Wissenschaft, 11/97, S. 124). Sie sind jetzt „zu einem unverzichtbaren Bestandteil der deutschen Forschungslandschaft geworden“, so Schulze. Neben ihrer wissenschaftlichen Arbeit erbringen sie wichtige ▶

Serviceleistungen für die Forschung und sind in der Politikberatung und der Ausbildung tätig. Weil dies von überregionaler Bedeutung und gesamtstaatlichem Interesse ist, werden sie von Bund und Ländern gemeinschaftlich – in der Regel zu je 50 Prozent – gefördert.

Auch die fünfzehn früheren Großforschungseinrichtungen in der HGF – die sechzehnte, das GMD-Forschungszentrum Informationstechnik, ist inzwischen zur Fraunhofer-Gesellschaft gewechselt – haben ihr Selbstverständnis und ihre Struktur geändert. An ihrer Finanzierung mit öffentlichen Mitteln beteiligt sich der Bund zu 90, das jeweilige „Sitzland" zu 10 Prozent. Ziel ist eine stärker an wissenschaftlichen Inhalten und Programmen orientierte Förderung. Wie Schwerpunkte im Forschungsprozess begründet werden, erläuterte Schulze während der HGF-Jahrestagung Ende November. Die Zentren wollen sich von der bloßen Ressourcenverwaltung abkehren und die Budgets inhaltlich über Forschungsprogramme steuern. In diese Richtung wird auch die Systemevaluation der HGF weisen, die der Wissenschaftsrat noch im Januar verabschieden will.

Mit diesen beiden übergreifenden Bewertungen werden dann Stellungnahmen des Wissenschaftsrates zu allen großen Forschungsorganisationen vorliegen. Die Fraunhofer-Gemeinschaft, die Max-Planck-Gesellschaft und die Deutsche Forschungsgemeinschaft wurden bereits früher evaluiert (Spektrum der Wissenschaft, 4/99, S. 104, und 9/99, S. 96).

Außer dem Wegfall der staatlichen Detailsteuerung werden gefordert:

- ➤ ein deutlicherer Bezug zu Anwendungen und zur Praxis,
- ➤ der Ausbau der institutionenübergreifenden anwendungsorientierten Programmförderung von Bund und Ländern,
- ➤ die intensivere Nutzung von Informations- und Kommunikationstechniken,
- ➤ die stärkere Internationalisierung des deutschen Wissenschaftssystems sowie
- ➤ eine unabhängige Struktur für die Förderung der Grundlagenforschung auf europäischer Ebene.

Künftig müssen die Wissenschaftseinrichtungen ihr jeweiliges Profil stärker

AM RANDE

Ins Hirn geguckt

Seit ich hauptberuflich Wissenschaftsjournalist und damit praktisch immer auf Themensuche bin, studiere ich die Aushänge in meinem ehemaligen Institut besonders gründlich. Abgesagte Vorträge, alte Autos, Studentenzimmer … halt, da ist was Interessantes. Es werden Versuchspersonen für neuropsychologische Experimente im Kernspin-Tomographen gesucht. Ich wollte schon immer mal wissen, wie so ein Ungetüm von innen aussieht – dito in Bezug auf mein Hirn. Praktischerweise gibt's einen Schnipsel zum Abreißen und Mitnehmen, mit einer E-Mail-Adresse drauf.

Der Projektleiter ruft auch gleich zurück, innerhalb weniger Minuten ist alles geklärt – ich habe weder Klaustrophobie noch Metallteile im Körper, und das Experiment ist völlig nichtinvasiv. Magnetfelder sollte ich gerade noch aushalten, laut „New Scientist" machen sie sogar glücklich. Wenn das mal stimmt…

Knapp eine Woche später sitze ich dann in einem halbdunklen Labor am Computer, um den Test schon mal im Trockenen zu üben, während die zwei Hirnforscher ihren Magneten starten. Wenn ein Kreis kommt, muss ich mir merken, dass ich ein paar Sekunden später den linken Knopf drücken muss, aber erst, wenn mich ein weiteres Symbol mit einem Fragezeichen dazu auffordert. Es soll zwischen der Planung und der Ausführung einer Handlung unterschieden werden. Kommt ein Quadrat, dann muss ich nach Anforderung den rechten Knopf drücken, und bei einem Dreieck muss ich wie Schrödingers Katze im Zustand der Unentschiedenheit verharren, bis mir das Anforderungssymbol verrät, ob ich links oder rechts drücken soll.

Soweit ist alles klar. Das neurologische Korrelat der Genialität werden die beiden mit diesem Test wohl nicht entdecken, denke ich, aber vielleicht gibt's ja wirklich einen Unterschied zwischen den Malen, wo ich zehn Sekunden lang „links, links, links" denke, und jenen, wo ich in freudiger Erregung auf das alles entscheidende Symbol warte.

Dann geht's los: Plastikbrille statt meiner metallischen, zusätzlich Prismengläser, damit ich um die Ecke und aus der Röhre hinausgucken kann. Knöpfe zum Drücken in der rechten Hand, ein Blasebalg als Notbremse in der linken. Ohrstöpsel und Kopfhörer, denn die Maschine ist ziemlich laut. Warum, weiß keiner der Experten, ist eben so. Dann werde ich in die Röhre geschoben, mein dicker Kopf mit Kopfhörern passt erst im fünften Anlauf, und schließlich wird das Gerät angeworfen. Die ersten zwanzig Durchgänge schaffe ich noch mit einiger Konzentration, aber danach beherrscht nur noch ein Gedanke das Objekt dieses Experiments: Wann hört dieser Lärm auf? Der Versuch soll etwa eine Stunde dauern, aber das Zeitgefühl ist unter diesen Bedingungen völlig abgeschaltet (zumal die Zeitintervalle in den Schritten des Experiments zufällig variiert werden).



Zu einem gewissen Zeitpunkt entschließe ich mich (immer in dem Bewusstsein, dass jeder Gedanke irgendwo auf einem Bildschirm ein verdächtiges Flackern auslösen kann), noch hundert Durchgänge dieses Idiotentests mitzumachen und dann den Blasebalg zu drücken. Das Zählen der Durchgänge hilft mir, bei halbwegs klarem Verstand zu bleiben, und nach etwa fünfzig Runden ist das Experiment dann tatsächlich zu Ende (abgesehen von weiteren fünf Minuten für ein Strukturbild, aber die sind schon fast Erholung).

Im Anschluss bleibt nicht viel Zeit für wissenschaftliche Diskussionen, da der nächste Kandidat schon im Vorbereitungsraum ist. Ich bekomme immerhin noch einen dringend benötigten Kaffee im Großraumbüro mit Tageslicht und ohne Lärm. Ich versuche, zu Hause anzurufen, kann mich aber zum ersten Mal in meinem Leben nicht an die eigene Telefonnummer erinnern. Liegt das jetzt an dem Idiotentest, am Lärm oder am Magnetfeld? Es gibt noch viel zu erforschen.

Michael Groß

Der Autor ist Biochemiker in Oxford.

herausarbeiten. Grundsätzlich sollen sie nur noch mit begrenztem Auftrag und zunächst befristet eingerichtet werden. Während die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) das wichtigste Instrument zur Finanzierung der Grundlagenforschung bleibt, wird die Förderung der anwendungsbezogenen Forschung umstrukturiert und ausgebaut werden. Zwei Punkte sind hierbei besonders wichtig: einerseits die Stärkung des institutionellen Wettbewerbs sowie andererseits intensivere Kooperationen zwischen unterschiedlichen Wissenschaftseinrichtungen, die zum Teil komplexe Verbünde bilden sollen.

Die Leibniz-Institute sind aus den fachlichen Bewertungen, die der Wissenschaftsrat in den letzten fünf Jahren vorgenommen hat, eindeutig gestärkt hervorgegangen. Der WGL-Vorsitzende Frank Pobell sieht ihre Reputation und ihr Selbstbewusstsein gefestigt. Ihre mitunter als „Gemischtwarenladen“ hämisch abgetane fachliche „Heterogenität“ – von der Paläontologie bis zur Mikroelektronik, vom Institut für Deutsche Sprache, den Sozial- und Wirtschaftsforschungsinstituten bis zur Tropenmedizin und der Molekularen Pharmakologie – wandelt sich zur föderalistischen Vielfalt als der eigentlichen „Mission“ der WGL, so der Wissenschaftsrat. Dem Bundesrechnungshof, der jüngst den Aufwand der gemeinschaftlichen Bund-Länder-Förderung als ineffizient kritisierte, hält der Wissenschaftsrat entgegen, die erwiesene Qualität der wissenschaftlichen Leistungen der Leibniz-Institute und ihre gute Synergie rechtfertigten den Koordinierungsaufwand.

Allerdings will und soll die WGL nicht eine „Trägerorganisation“ von Instituten werden wie etwa die Max-Planck-Gesellschaft. Sie bleibt ein Verband selbstständiger Institute. Doch die Wege zu einer inhaltlichen wissenschaftlichen Steuerung werden ausgebaut. So wird ein Teil ihrer regulären Mittel bei der DFG deponiert und von dieser auf Antrag sowie nach wissenschaftlicher Begutachtung vergeben. Ähnlich funktioniert der zentrale Strategiefonds der HGF.

Der Wissenschaftsrat drängt darauf, dass die WGL- und HGF-Institute die Kooperationsmöglichkeiten nicht nur mit Einrichtungen innerhalb ihrer eigenen „Säule“, sondern auch mit anderen öffentlich oder privat finanzierten Partnern nutzen, insbesondere mit Universitäten und Fachhochschulen. Netzwerke und komplexe Verbundstrukturen können auf allen Ebenen aufgebaut werden – sei es lokal, regional, überregional oder europäisch.

Neu in der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz: das Hans-Knöll-Institut für Naturstoffforschung in Jena

REINALD SCHORCHT

Ein aktuelles Beispiel dafür, wie örtliche Synergien entstehen können, ist das Institutsgelände Beutenberg in Jena. Dort soll jetzt nach dem – durch seine Teilhabe am Human-Genom-Projekt bekannt gewordenen – Leibniz-Institut für Molekulare Biotechnologie auch das bisher landeseigene Hans-Knöll-Institut für Naturstoffforschung in die WGL aufgenommen werden. Im November empfahl der Wissenschaftsrat, eine Strukturkommission für den Campus Beutenberg Jena zu bilden, wo auch einige andere wissenschaftliche Institute ansässig sind. Dieses Gremium soll ein Konzept erarbeiten, wie die beiden Institute intensiver zusammenarbeiten können. Mittelfristig dürfte daraus ein Zentrum für biomedizinische Forschung entstehen.

Eigenes Profil stärken, Zusammenarbeit intensivieren

Schon in den vergangenen Jahren hat die WGL die Zusammenarbeit zwischen den eigenen Instituten und auch mit anderen verstärkt. In der Sektion Lebenswissenschaften zum Beispiel haben das Forschungszentrum Borstel für Medizin und Biowissenschaften, das Bernhard-Nocht-Institut für Tropenmedizin und das Heinrich-Pette-Institut für Experimentelle Virologie eine so genannte biomedizinische Allianz vereinbart, die auch Einrichtungen der Medizinischen Universität Lübeck und der Universität Hamburg einschließt. Daraus soll ein gemeinsamer Sonderforschungsbereich entstehen. Der biomedizinischen Allianz haben sich über die Region Hamburg-Lübeck hinaus auch das Leibniz-Institut für Molekulare Biotechnologie in Jena, das Deutsche Institut für Ernährungsforschung in Bergholz-Rehbrücke bei Potsdam, das Diabetes-Forschungsinstitut in Düsseldorf, das Deutsche Primatenzentrum in Göttingen, das Forschungsinstitut für Molekulare Pharmakologie in Berlin und das Institut für Neurobiologie in Magdeburg angeschlossen.

Forschungs-Netzwerke

Weiter gespannt als die entsprechende WGL-Sektion ist das Netz des Materialforschungsverbundes Dresden. In ihm arbeiten drei Leibniz-Institute, elf Institute der Technischen Universität, vier Fraunhofer-Institute und eine Forschungsgesellschaft zusammen. Ebenfalls in Dresden wird ein Labor für gepulste, sehr hohe Magnetfelder geplant, in dem Einrichtungen der WGL, der Max-Planck-Gesellschaft und der Technischen Universität kooperieren. In Berlin hebt der Wissenschaftsrat die Selbstorganisation interdisziplinärer Forschungsverbünde in den Grenzbereichen zwischen Material- und Werkstoff- sowie Lebenswissenschaften hervor. An ihnen sind neben Leibniz- und Helmholtz-Instituten auch die Universitäten und industrieeigene Einrichtungen beteiligt. Sie trügen, so lobt der Wissenschaftsrat, „als Koordinierungs- und Programmverbünde … zur Schwerpunktbildung und Profilierung der Berliner Forschung bei“.

Sechs Leibniz-Einrichtungen bereiten eine bundesweite Kooperation auf dem Forschungsfeld der Biodiversität vor. Auch in den Raum-, Wirtschafts- und Umweltwissenschaften sind in der WGL Ansätze zur Zusammenarbeit zu erkennen, die dem Wissenschaftsrat zufolge allerdings verstärkt werden müssten.

Wesentlich weiter reichen Selbstorganisationspläne zur Neuordnung der gesamten medizinischen Forschung in Deutschland, die aus den Reihen der HGF dem Wissenschaftsrat vorgelegt ▶

(Seiten 100, 101 und 102: Anzeige und Beihefter)

wurden. Dieser Bereich ist der erste, in dem sie, wie ihr Vorsitzender Detlev Ganten sagte, die programmorientierte Förderung realisieren will. An die Stelle eines bisher schon in Teilen bestehenden Klinisch-Biomedizinischen Forschungsverbundes, an dem die HGF festhalten will, soll nach dem amerikanischen Vorbild der National Institutes of Health eine Organisation „Deutsche Zentren für Gesundheitsforschung" (DZG) treten. Der Intitiator Harald zur Hausen, Leiter des Deutschen Krebsforschungszentrums (DKFZ) in Heidelberg, will die wissenschaftlichen Aufgaben in klarer Arbeitsteilung den Helmholtz-Instituten DKFZ (Krebs), Max-Delbrück-Zentrum für Molekulare Medizin in Berlin-Buch (Herz und Kreislauf), GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit in München-Neuherberg (Allergien) sowie Gesellschaft für Biotechnologische Forschung in Braunschweig (Infektionen) zuteilen. Leibniz-Institute sollen in diesem Rahmen die drei Komplexe Ernährung, Gehirn und Tropenmedizin übernehmen. An der Spitze der Deutschen Zentren für Gesundheitsforschung sollen ein Präsident und ein Senat stehen.

Sowohl dieser Plan als auch die Aktivitäten in der Leibniz-Gemeinschaft zeigen, dass das deutsche Wissenschaftssystem gründlicher als je zuvor umgestaltet werden wird. In den politischen Entscheidungen wird der Einfluss des Staates erhalten oder sogar noch gestärkt. „Der durch Koordinationsmechanismen kontrollierte Wettbewerb von Bund und Ländern um die optimale Förderung der Wissenschaft stellt sicher, dass in den Prozess der Formulierung und Aushandlung der Wissenschaftspolitik eine Vielzahl unterschiedlicher Impulse eingehen können", stellt der Wissenschaftsrat fest. Für den eigentlichen Wissenschaftsbereich jedoch sollen die „Mechanismen der Selbstregulation" wirksam und verstärkt werden. Er sollte auch frei gehalten werden von den „traditionellen Stereotypen der Argumentation und Praxis in Wissenschaftspolitik und -administration". Die „vermeintlichen Gegensätze" Grundlagenforschung/anwendungsorientierte Forschung sowie wissenschaftsorientierte Bildung und praxisorientierte Ausbildung, von denen das heutige System noch immer bestimmt ist, sollten der Vergangenheit angehören. ■

***G. Hartmut Altenmüller** ist Bonner Korrespondent von Spektrum der Wissenschaft.*

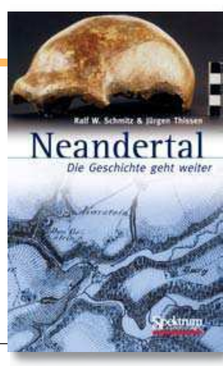
UR- UND FRÜHGESCHICHTE

Ralf W. Schmitz und Jürgen Thissen

Neandertal

Die Geschichte geht weiter

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2000.
327 Seiten, DM 49,80



Nach Untersuchung dieses Gerippes, namentlich des Schädels, gehörte das menschliche Wesen zu dem Geschlecht der Flachköpfe, deren noch heute im amerikanischen Westen wohnen ... Vielleicht trägt dieser Fund zur Erörterung der Frage bei, ob diese Gerippe einem mitteleuropäischen Urvolke, oder bloss einer (mit Attila ?) streifenden Horde angehört haben.“ So schrieben lokale Zeitungen im September 1856, einen Monat, nachdem bei der Ausräumung einer Grotte im Neandertal nahe Düsseldorf Überreste eines merkwürdigen Skeletts geborgen und von dem Amateurpaläontologen Johann Carl Fuhlrott aus dem nahen Elberfeld für menschlich und sehr alt erklärt worden waren. Damit begannen die vielen – mehr oder weniger wissenschaftlichen – Versuche, die Fundstücke mit Leben zu erfüllen.

Die Archäologen und Urgeschichtler Ralf W. Schmitz und Jürgen Thissen berichten nicht nur über den Fund, sondern vor allem über den Fundort, ursprünglich ein wildromantisches Durchbruchstal der Düssel, an dem sie selbst intensive Feld- und Laborforschungen betreiben.

Das Tal erhielt seinen Namen nach dem barocken Kirchenliederdichter, der seinen Namen Neumann zu Neander gräzisierte. Ob er wirklich jemals dort war, bleibt ungewiss. Zur Zeit der Romantik gewannen das wilde Tal und seine Grotten einen Ruf als Festort der Düsseldorfer Maler. Freilich mussten diese bald der Industrialisierung weichen, weil die Talkalke nicht nur als Baumaterial, sondern in gewaltigen Mengen für die Hochofenverhüttung der nahen Eisenerze benötigt wurden. Nur weil der die Nutzung störende Lehm der Höhlen ausgeräumt wurde, kamen die in ihm eingebetteten Fossilien und damit auch der Neandertaler zu Tage.

Fuhlrott fand mancherlei Unterstützung für seine frühe Datierung. Der Bonner Anatom Hermann Schaaffhausen publizierte den Fund 1858 und wies ihn dem Ausgang des Diluviums zu, dessen Datierung damals noch unsicher war. Zugleich erklärte er ihn für atavistischer als die „roheste“ der heutigen Rassen; er sei zu jenen „Autochthonen“ zu stellen, die von den neu einwandernden „Indogermanen“ vorgefunden und verdrängt wurden. Andere sahen in dem Fund einen gefallenen Kosaken oder erklärten, wie der berühmte Pathologe Rudolf Virchow, die Form der Knochen mit einer rachitischen Erkrankung.

Trotz großer Bedenken wegen der offensichtlichen Nähe zu den Schimpansen wies 1864 der irische Forscher William King den Fund der neuen Spezies *Homo neanderthalensis* zu. Allerdings klassifizierte er sie auch als „sittlich umnachtet“, noch unter den „primitiven“ zeitgenössischen Andamanen. Gleichwohl war damit etwas Unerhörtes geschehen: Die Gattung Mensch war erstmals in zwei Arten geteilt, den tumben Ureuropäer und seinen – bei großer kultureller Variationsbreite – intelligenteren Nachfolger, den modernen Menschen.

Damit begann eine bis heute hitzig geführte Diskussion: Wie sind die verwandtschaftlichen Beziehungen zwischen den beiden Menschengruppen? Es nahm der Auseinandersetzung kaum an Schärfe, dass inzwischen ältere, atavistischer wirkende Menschenarten, vom *Homo erectus* bis zum *Homo ergaster*, gefunden wurden, die bis auf 1,8 Millionen Jahre datiert werden können.

Derweil blieb weitgehend unbeachtet, was wir unterdessen durch zahlreiche neue Funde vom Leben und von den Leistungen der Neandertaler wissen: Sie lebten erfolgreich über einen Zeitraum von mindestens 150 000, vielleicht 250 000 Jahren im westlichen Eurasien. Sie sammelten und jagten Nieder- und Hochwild in den warmzeitlichen Auen und Steppen. Aber sie drangen auch in die eiszeitliche Strauchtundra vor, als diese sich vor 70 000 bis 60 000 Jahren bis in den Raum von Braunschweig ausbreitete. Selbst mit Stein- und Knochenspitzen bewehrte Jagdwaffen nutzten sie schon und legten bereits Gräber an. In der Ukraine kennen wir große von ihnen gebaute Hütten.

Vermischung oder Verdrängung?

Im westlichen Vorderasien tauchten bereits vor 80 000 bis 60 000 Jahren Menschenformen auf, die keine „typischen“ Neandertaler sind. Sie werden wechselnd als Übergangsformen zum oder als Mischlinge mit dem modernen Menschen angesehen, von denen freilich dort kein einziger gefunden wurde. Das Problem wird in das fundarme Afrika verschoben, wo es zwar atavistische Zeitgenossen der Neandertaler, aber sie selbst tatsächlich nicht gibt. Dafür haben anscheinend besonders „typische“ Neandertaler in den für sie günstigen relativ warmen Waldsteppenräumen des südlicheren Europas bis vor 35 000 Jahren, vielleicht sogar noch länger überdauert und eigenständige materielle Ausstattungen hinterlassen. Ein Szenario, das sehr gut zu einer allmählichen Veränderung der beiden Arten passen würde. Aber selbst dort wird jene Schwelle erreicht, an der nach gerade einmal einem Jahrhundert kein Urenkel mehr das typische Neandertalergesicht des Urgroßvaters hat, sondern die dominant vererbten Züge der „modernen“ Menschen. Und


Die Lithographie von 1826 zeigt ein Künstlerfest in der Neanderhöhle.



auch seine schweren Wurfspeere bauen sie nicht mehr. Ein Szenario, das Überschneidungen, Vermischungen und auch Wanderungsbewegungen über weit offene Grenzen hinweg nicht ausschließt.

Demnach wären auch in uns selbst Teile des körperlichen und geistigen Erbes der Neandertaler erhalten geblieben. Dem widersprechen auch nicht die neuesten genetischen Ähnlichkeitsanalysen an Zellkernresten. Denn wie die Autoren detailreich und spannend berichten, liegen die Werte bei Knochenproben vom Originalfund immer noch im Streubereich moderner, mehr als 40000 bis 50000 Jahre jüngerer Vergleichsserien.

Auch dies ist nicht überraschend, wenn man sich vergegenwärtigt, dass alle menschlichen Populationen über die Zeiten hinweg in einheitlicher Entwicklungstendenz ihre frontalen Hirnpartien ausgebaut und damit auch den Stirnbereich ständig aufgewölbt haben. Je nach den ökologischen Vorgaben, zu denen auch die Dichte der jeweiligen Populationen gehört, sind dabei unterschiedliche Beschleunigungen zu erwarten.

Ganz andere Aspekte berühren die letzten Kapitel, in denen die Autoren ihre beharrlichen und beispielhaften feldarchäologischen Arbeiten darstellen. Dabei fanden sie tatsächlich nicht nur alte Höhlensedimente aus der Steinbruchzeit des Neandertals wieder, sondern neben Steingeräten aus Neandertalers Zeiten sogar ein Knochenfragment, das sich nach 143 Jahren zweifelsfrei an einen Oberschenkel des „Urfundes“ von 1856 anpassen ließ.

Die Grabungen vor Ort sind noch im Gange und werden unser Wissen über den Neandertaler und seine Zeit noch weiter mehren.

Hansjürgen Müller-Beck

Der Rezensent ist emeritierter Professor für Ur- und Frühgeschichte an der Universität Tübingen.



WISSENSCHAFTSSOZIOLOGIE

Bettina Heintz

Die Innenwelt der Mathematik

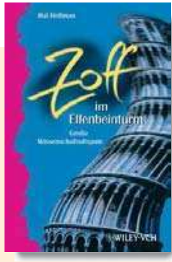
Springer, Wien 2000. 318 Seiten, DM 69,–

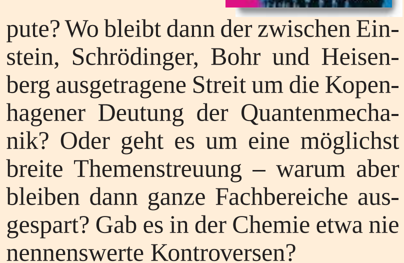
Mathematisches Wissen gilt als erfahrungsunabhängig – *a priori* in Kants Ausdrucksweise – und damit sicher. Es wird begründet durch Beweise und ist dadurch in aller Regel nicht kontrovers. Das Gebäude der Mathematik wird Stein um Stein kumulativ aufgeführt, unbehelligt von Revolutionen, wie sie andere Wissenschaften heimsuchen. Und ihre Gegenstände existieren außerhalb von Zeit und Raum – soweit die gängige Vorstellung. „Die moderne Mathematik zeichnet sich durch Merkmale aus, die für eine soziologische Analyse tatsächlich kaum Raum mehr lassen“, konzediert Bettina Heintz gegen Ende ihres Buches. Dennoch gelingt es ihr, 275 oft hochinteressante Seiten mit einer solchen zu füllen.

Auf die Frage „Was ist Mathematik?“ gibt Heintz eine informative Übersicht zu den verschiedensten Positionen in der Mathematikphilosophie. Den Anfang machen die altbekannten „ismen“: Platonismus, Intuitionismus und Formalismus. Eine markante Schwierigkeit ist das Truth/proof-Problem: Wie lässt es sich erklären, dass Beweisbarkeit und Wahrheit in der Mathematik zusammenfallen? Oder ist das gar nicht so?

Im Anschluss an Karl Popper hat Imre Lakatos 1963 in „Beweise und Widerlegungen“ die geschichtliche Bedingtheit mathematischen Wissens herausgestellt. Dieses entwickle sich in einem Wechselspiel von Beweisversuchen, Widerlegungen, Präzisierungen und erneuten Beweisversuchen und habe damit die Qualität von Erfahrungswissen: „Ein Beweis ist im Prinzip immer nur wahr auf Zeit.“ Gegen diesen „Quasi-Empirismus“ setzt Saunders MacLane, ein führender Mathematiker unserer Tage, die Behauptung „Mathematics rests on proof and proof is eternal” und gibt damit wohl die Mehrheitsansicht der mathematischen Gemeinschaft wieder. Die Soziologie sieht die Mathematik doch deutlich anders als diese sich selbst.

Bettina Heintz hat dazu in Interviews am Bonner Max-Planck-Institut für Mathematik herauszufinden versucht, wie Mathematiker arbeiten und welches Selbstverständnis sie dabei haben. So erfährt man, woran ein Mathematiker noch lange vor dem Beweis zu erkennen glaubt, ob eine Behauptung wahr ist („Schönheit“), was es mit dem „Aufschreiben“ – allgemein mit der symbolischen Dimension von Mathematik – auf sich hat und wie Mathematiker über die Möglichkeiten denken, die der Computer bietet. Interessante Fragen, zu denen bislang wenig Material vorlag. ▶





WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Hal Hellman

Zoff im Elfenbeinturm

Aus dem Englischen von Anna Schleitzer
VCH-Wiley, Weinheim 2000. 245 Seiten, DM 48,–

Mit der Wissenschaft ist es wie mit dem Leben. Was macht sie interessant? Das Neue, das gesucht und gefunden wird. Was macht sie schmackhaft? Der deftige Disput. Der amerikanische Wissenschaftsjournalist Hal Hellman hat zehn der größten neuzeitlichen Wissenschaftsdispute episodenhaft in einem Buch versammelt, und es ist ihm gelungen, auf dem schmalen Grat zwischen wissenschaftlicher Authentizität und Vermittlung von Lesespaß zu bestehen. Seine Aufbereitung bedeutender Streitfälle ist brav („Urban VIII. gegen Galilei“) bis brillant („Wegener gegen alle: Die Kontinentaldrift“); allein die Auswahl seiner Top Ten erscheint nicht ganz einsichtig. Geht es hier wirklich um die „lebendigsten“ jemals ausgetragenen wissenschaftlichen Dispute? Wo bleibt dann der zwischen Einstein, Schrödinger, Bohr und Heisenberg ausgetragene Streit um die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik? Oder geht es um eine möglichst breite Themenstreuung – warum aber bleiben dann ganze Fachbereiche ausgespart? Gab es in der Chemie etwa nie nennenswerte Kontroversen?

In jedem Fall ist der Anekdotenzyklus lesenswert, vor allem weil Hellman am Ende eines jeden Kapitels – ob es sich nun um Infinitesimalrechnung, Fossilien oder Gene dreht – den historischen Streitfall noch einmal mit dem heutigen Stand der Dinge in Beziehung setzt. Und so vermittelt er nicht nur historisches, sondern auch aktuelles Wissen.

Carsten Könneker

ZOOLOGIE

Preben Bang (Text) und Preben Dahlström (Zeichnungen)

Tierspuren

Fährten, Fraßspuren, Losungen, Gewölle und andere

Aus dem Dänischen von Walther Thiede
BLV, München 2000. 264 Seiten, DM 39,90

Der handliche, dennoch umfangreiche Band ist mehr als ein Bestimmungsbuch: eine spannende kleine Einführung in „Naturkunde“, die durchaus als unterhaltsame Wohnzimmerlektüre herhalten kann.

Anhand zahlreicher Fotos und Skizzen zeigen die dänischen Autoren, welche Spuren nord- und mitteleuropäische Säugetiere und vor allem größere Vögel bei ihren verschiedenen Aktionen hinterlassen. Sie erklären, wie spezifische Fährten und Fraßspuren entstehen, wie Bauten und Markierungen aussehen, woran die Exkremente zu unterscheiden sind und mehr. Auch „Neubürger“ werden erwähnt, wie der aus Nordamerika stammende Waschbär oder der asiatische Muntjak, ein kleiner nach England und Frankreich eingeführter Hirsch.



Der Große Buntspecht keilt Nadelbaumzapfen mit der Spitze nach oben in irgendwelchen Spalten fest und hackt mit seinem meißelförmigen Schnabel die Samen heraus.

Naturliebhaber werden in dieser nach dreißig Jahren stark überarbeiteten, erweiterten Neuauflage manche Anregung zu neuen Entdeckungen finden sowie Antworten auf eigene Beobachtungen. Wer endlich wissen möchte, wie die „Schmiede“ eines Buntspechts aussieht oder ein von Staren bearbeiteter Kuhfladen, dem sei dieses sachkundig und liebevoll geschriebene wie auch gestaltete Bestimmungsbuch warm empfohlen.

Adelheid Stahnke

Einen Ansatzpunkt für die soziologische Analyse liefert eine Funktion des Beweises: Ein Beweis soll die mathematische Gemeinschaft überzeugen, er ist Mittel der Kommunikation. Die Produktion mathematischen Wissens (unter Einschluss von dessen Kommunikation) ist damit sozial konditioniert. Die traditionellen wissenschaftstheoretischen Kontexte Entdeckungs- und Begründungszusammenhang (*context of discovery, context of justification*) sind zu ergänzen durch einen Überzeugungszusammenhang (*context of persuasion*).

Zentrale These der Autorin ist: „Der Beweis ist ... ein hochgradig normiertes Kommunikationsverfahren, das die spezifischen Verständigungsprobleme der Mathematik zu lösen hilft.“ Er ist unter anderem ein Reflex darauf, dass die Gegenstände der Mathematik nicht sinnlich gegeben sind, folglich die konsensbildenden Verfahren der Naturwissenschaften nicht angewandt werden können. Der Beweis dient dazu, Intersubjektivität und Nachprüfbarkeit herzustellen; er vermittelt zwischen der subjektiven Evidenz, die ein Mathematiker empfindet, und dem Kritikbedürfnis anderer Experten.

Damit stellt sich aber das Problem der Interpretation, denn Beweise sprechen nicht für sich selbst. Real existierende Beweise sind niemals vollständig formalisiert. Folglich muss der Interpret Vorwissen mitbringen, von dem wiederum seine Interpretation beeinflusst wird. Es zeigt sich so der in den Geisteswissenschaften gut bekannte hemeneutische Zirkel – wohl unerwartet, geht man von der üblichen Sicht der Mathematik aus.

Mathematiker-Soziologie

Überhaupt ist es ein großes Verdienst dieses Buches, zu zeigen, dass viele Fragen, die in anderen Kontexten geläufig sind, auch für das Verständnis der Mathematik relevant sind.

Während bis weit ins 18. Jahrhundert der meist über Briefe vermittelte persönliche Kontakt eine Schlüsselrolle spielte, sieht sich der heutige Mathematiker einer weitgehend anonymen Wissenschaftlergemeinschaft gegenüber. Die Überzeugungsarbeit ist heute medienvermittelt; sie bedient sich verallgemeinerter symbolisch vermittelter Kommunikation. Damit ist man mitten in der modernen Soziologie gelandet mit bedeutenden Namen wie Mead, Habermas und Luhmann – die man im Zusammenhang mit Mathematik nicht zu hören gewohnt ist.

Die Herausbildung dieser neuartigen konsensbildenden Kommunikationsmittel geht auf Veränderungen des 19. Jahrhunderts zurück: die Professionalisierung des Mathematikerberufes, insbesondere des Mathematiklehrers an höheren Schulen und Universitäten, die starke zahlenmäßige Zunahme von Berufsmathematikern (erst recht in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts), die Abgrenzung der Mathematik gegen Nachbargebiete wie theoretische Physik und die fortschreitende Verzahnung von Forschung und Lehre. Diese machten strenge, möglichst kontextunabhängige Beweise notwendig und führten zu jenem grundlegenden Wandel, den man gerne mit Felix Kleins eingängigem Terminus „Arithmetisierung“ nennt. Herausgekommen ist die Mathematik, die wir kennen, ohne „Spuren menschlicher Herkunft“.

Gerade diese Sichtweise ist diskussionswürdig; so halte ich die These vom Einfluss der Lehre noch für nicht ausreichend belegt. Zu prüfen wäre auch, wie groß der Unterschied zwischen modernen und traditionellen Beweisen – etwa bei Euklid – wirklich ist. Hier wäre noch viel mathematikhistorische Feinarbeit zu leisten.

Für einen Mathematiker, der das Schema Definition–Satz–Beweis–Beispiel verinnerlicht hat, ist vieles an diesem Buch gewöhnungsbedürftig – darunter vieles, das hier nicht erwähnt werden kann; aber die Mühe wird belohnt durch zahlreiche neue Aspekte und Einsichten. Eine umfassendere Sicht der Mathematik ist immer ein Gewinn, gerade für ein Fach, das noch mehr als andere im Elfenbeinturm steckt, und gerade im „Jahr der Mathematik“ 2000. Und Bettina Heintz setzt keineswegs der einen Borniertheit eine andere gegenüber: Sie entsagt jedem Alleinvertretungsanspruch der soziologischen Sichtweise, betont in wohltuender Weise immer wieder die Wichtigkeit anderer Zugänge und relativiert die eigene Analyse.

Klaus Volkert

Der Rezensent ist Akademischer Rat im Fach Mathematik an der Pädagogischen Hochschule Heidelberg und Privatdozent für Geschichte der Mathematik an der Universität Heidelberg.



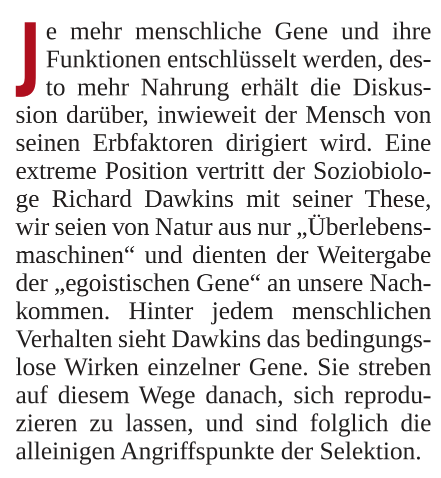
BIOLOGIE

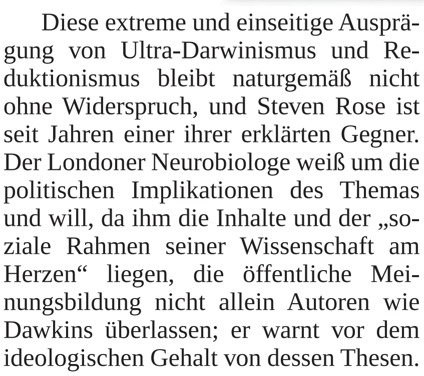
Steven Rose

Darwins gefährliche Erben

Biologie jenseits der egoistischen Gene

Aus dem Englischen von Susanne Kuhlmann-Krieg
C. H. Beck, München 2000. 363 Seiten, DM 49,90





Je mehr menschliche Gene und ihre Funktionen entschlüsselt werden, desto mehr Nahrung erhält die Diskussion darüber, inwieweit der Mensch von seinen Erbfaktoren dirigiert wird. Eine extreme Position vertritt der Soziobiologe Richard Dawkins mit seiner These, wir seien von Natur aus nur „Überlebensmaschinen" und dienten der Weitergabe der „egoistischen Gene" an unsere Nachkommen. Hinter jedem menschlichen Verhalten sieht Dawkins das bedingungslose Wirken einzelner Gene. Sie streben auf diesem Wege danach, sich reproduzieren zu lassen, und sind folglich die alleinigen Angriffspunkte der Selektion.

Diese extreme und einseitige Ausprägung von Ultra-Darwinismus und Reduktionismus bleibt naturgemäß nicht ohne Widerspruch, und Steven Rose ist seit Jahren einer ihrer erklärten Gegner. Der Londoner Neurobiologe weiß um die politischen Implikationen des Themas und will, da ihm die Inhalte und der „soziale Rahmen seiner Wissenschaft am Herzen" liegen, die öffentliche Meinungsbildung nicht allein Autoren wie Dawkins überlassen; er warnt vor dem ideologischen Gehalt von dessen Thesen.

Mit seinem neuen Buch legt Rose eine gründliche Auseinandersetzung vor. Dabei verfällt er keineswegs ins andere Extrem; er bleibt auf dem Boden des Materialismus, akzeptiert den Darwinismus als zentrale Theorie und zitiert zustimmend den Populationsgenetiker Theodosius Dobzhansky: „Nichts in der Biologie ergibt Sinn, außer im Lichte der Evolution." Im vorliegenden Buch konzentriert er sich auf die naturwissenschaftliche, biologie-interne Diskussion.

Die Wissenschaft kann das Verhältnis von Ursache und Wirkung auf verschiedenen Ebenen untersuchen. Warum springt ein Frosch? Je nach Arbeitsgebiet und erkenntnistheoretischem Standpunkt antwortet ein Biologe: „Weil sich die Muskeln zusammenziehen", „weil der Frosch einer Gefahr entfliehen will" oder „weil sich sein Verhalten so entwickelt hat".

Auf einer dieser Ebenen, so Rose, hat der Reduktionismus seinen legitimen Platz. Aber seine Erhöhung zur Weltsicht beruhe sowohl auf ungenügenden Voraussetzungen als auch auf Überinterpretation wenig überzeugender Versuchsergebnisse. Rose löst sich vom Gen als alleinigem Untersuchungsgegenstand und ordnet die Zusammenhänge auf den einzelnen Stufen biologischer Komplexität: vom Gen über die Zelle zum Organismus.

„Das Gen für" einen bestimmten Wesenszug kann es in Roses Augen gar nicht geben, denn in einem Lebewesen mit eigener Geschichte, das ständig mit der Umwelt im Wechselspiel steht, antworten jeweils mehrere Gene auf die sich ändernde Umgebung. Die Genomforschung wird diese Einschätzung eher erhärten als entkräften, zumal Wissenschaftler verstärkt nicht mehr nur einzelne Gene beschreiben, sondern deren Interaktionen und ihr Zusammenwirken beim Entstehen der Phänomene untersuchen.

Die Sprechweise des Ultra-Darwinismus vermag zwar mit eingängigen Metaphern wie der vom „egoistischen Gen" zu faszinieren, läuft dabei aber Gefahr, die Dinge vereinfacht darzustellen: mit dem Ergebnis, dass Resultate außerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft verzerrt wahrgenommen werden und sich unerfüllbare Hoffnungen an sie knüpfen. Auf eine sachliche Sprache gestützt und mit Rückgriffen auf Wissenschaftsphilosophen wie Karl R. Popper und Thomas Kuhn, verleiht Rose der Diskussion erkennbar mehr kritische Substanz und das nötige Profil – und zieht ein für uns attraktives Fazit: „Die Biologie macht uns frei."

Olaf Schmidt

Der Rezensent ist promovierter Molekularbiologe und Wissenschaftsjournalist in München.



MATHEMATIK

Pierre Basieux

Die Architektur der Mathematik

Denken in Strukturen

Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek 2000. 187 Seiten, DM 16,90

Pierre Basieux, Unternehmensberater und gelernter Mathematiker, möchte sein Buch als krönende Zusammenfassung seiner drei Essays „Die Welt als Roulette" (1995), „Abenteuer Mathematik" (1999; siehe Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 122) und „Die Top Ten der schönsten mathematischen Sätze" (2000) verstanden wissen.

Erst kommt das Gebäude und dann das Fundament – das ist nicht gerade, was ein Architekt unter „Architektur der Mathematik" verstehen würde, entspricht aber der historischen Entwicklung. Die Mathematik war gleichsam auf Sand gebaut, bis Georg Cantor (1845–1918) und seine Nachfolger sie mit der axiomatischen Mengenlehre auf eine solidere Grundlage stellten. Nun gibt es nichts mehr, was wegrutschen könnte, denn das ganze Gebäude der Mathematik mit seinen „mehr als dreitausend unterschiedlich spezialisierten Einzeldisziplinen" ruht auf – der leeren Menge!

Aus diesem Nichts den ganzen Reichtum mathematischer Strukturen zu konstruieren erfordert einigen Aufwand. Basieux erspart uns zwar die „masochistische Tortur" eines kompromisslosen Formalismus, wie die französische Gruppe Bourbaki ihn betrieb. Aber es gibt eine Fülle von Begriffen zu lernen, deren Sinn und Zweck sich erst aus ihrer späteren Verwendung erschließt. Der Überbau bestimmt eben doch weitgehend die Basis.

Auf dem Fundament des Mengenbegriffs stehen drei Säulen, die ihrerseits die Mathematik tragen. Es sind drei Typen von Beziehungen unter den Elementen einer Menge: algebraische, topologische und Ordnungsrelationen. In der Tat kann man von diesem radikal abstrakten Standpunkt Gemeinsamkeiten zwischen weit entfernten Teilgebieten sehen, die anderenfalls in der Detailfülle untergehen würden.

Das Buch vertritt eine sehr spezielle Sichtweise auf die Mathematik, die vom Leser erhebliche Denkarbeit verlangt. Basieux ist es gelungen, dieses spröde Thema in dem begrenzten Rahmen eines Taschenbuchs schmackhaft aufzubereiten.

Christoph Pöppe

GESCHICHTE

Dietrich Herrmann und Manfred Kühr

Rittertum & Mittelalter

Streifzug durch eine faszinierende Welt

CD-Rom. Theiss, Stuttgart 2000. Für PCs mit Windows und Pentium-Prozessor oder Macintosh PPC und höher. DM 69,–



Jürgen Süß et al.

Pergamon. Geschichte und Monumente der antiken Stadt

CD-Rom. Theiss, Stuttgart 2000. Für PCs mit Windows und Pentium-Prozessor. DM 69,–

Der Theiss-Verlag, Spezialist in Sachen Geschichte, nutzt mit seiner CD-Rom-Reihe „Geschichtsmomente“ die Möglichkeiten des Mediums, um Fakten und Daten zur Historie ansprechend zu vermitteln.

Womit kämpften Ritter? Wer gewann die Schlacht von Tannenberg? Warum musste Heinrich IV. den Gang nach Canossa antreten? Fragen, die „Rittertum & Mittelalter“ von der Projektgruppe „rosula“ unterhaltsam beantwortet. Von der Eroberung des Frankenreiches durch Chlodwig (um 466–511) bis zur Entdeckung Amerikas 1492 erstreckt sich der thematische Umfang dieses multimedialen „Lesebuches“. Die Hauptkapitel „Welt der Ritter“ und „Leben im Mittelalter“ führen in jeweils ein gutes Dutzend Unterthemen weiter. Eine „Chronik“ ermöglicht zudem, die Jahrhunderte nach interessanten Einzelthemen zu durchstreifen. Bilder, einfache Animationen und Videos – „Freizeit-Ritter“ demonstrieren beispielsweise die Handhabung der Waffen – sowie mittelalterliche Musikstücke schaffen den multimedialen Rahmen (überraschenderweise fehlt aber gerade im Kapitel „Musik und Tanz“ die akustische Untermalung). Kurze Texte vermitteln wichtige Informationen zur Zeit. Sie werden beim Aufrufen einer Seite vorgelesen, lassen sich aber auch einblenden. Die Menüführung ist einfach nachvollziehbar, die erforderlichen Buttons immer erreichbar. Erfreulich: Beide



Maustasten lassen sich nutzen. Alles in allem eine runde Sache für Menschen, die der Kindheitswunsch, ein Ritter werden zu wollen, nie ganz losgelassen hat.

Etwas spröder kommt „Pergamon – Geschichte und Monumente der antiken Stadt“ daher. Die Vermittlung geschichtlichen Wissens rund um diese Metropole der kleinasiatischen Antike stützt sich vor allem auf Fotografien von Ausgrabungsstätten und Artefakten, Grundrisse und einige Rekonstruktionen. Zur Navigation dient primär der „Stadtplan“, der Informationen zu den jeweiligen Epochen, Angaben zu den wichtigsten Gebäuden und fiktive Vorträge bedeutender historischer Personen bietet. Eine Menüleiste am unteren Rand ermöglicht auch einen direkten Zugang über die „Zeittafel“ oder den „Index“. Wie häufig bei CD-Roms ist es etwas umständlich, von einem Link wieder auf eine Seite zurückzukommen, denn die Software merkt sich nur die jeweils vorhergehende Seite.

Obwohl dieses Werk viel von einem Lehrbuch an sich hat, besticht seine klare und verständliche Zusammenstellung der Fakten. Der Benutzer erfährt vom Aufstieg und Fall Pergamons als Hauptstadt eines kleinasiatischen Reiches unter der Dynastie der Attaliden von 281 bis 133 vor Christus, von seinen finanziellen Problemen und dem späteren Wiedererblühen als Teil der römischen Provinz Asia, dem letztlichen Niedergang nach der Teilung des Imperiums im 4. nachchristlichen Jahrhundert. Die jüngste Geschichte – die Ausgrabung der Stadt durch deutsche Archäologen im 19. Jahrhundert – klingt leider nur vereinzelt an.

Insgesamt aber ist diese CD-Rom sehr empfehlenswert für angehende Besucher der Ruinen und zur Nachbereitung eines Aufenthalts.

Klaus-Dieter Linsmeier

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



KOSMOLOGIE

Paul Davies

Das fünfte Wunder

Auf der Suche nach dem Ursprung des Lebens

Aus dem Englischen von Bernd Seligmann
Scherz, Bern 2000. 320 Seiten, DM 48,90

Allem Anschein nach hat der Planet Erde eine äußerst turbulente Jugend gehabt. Immerhin ist nach heutigen Erkenntnissen der Mond ein ehemaliges Stück Erde; der Meteorit, der diesen Brocken aus der frühen Erde herausschlug, muss den Planeten gründlich aufgemischt haben. Und das war nur der schlimmste unter zahlreichen Treffern. Dagegen war der Meteorit, der nach allgemeiner Auffassung vor 65 Millionen Jahren die Dinosaurier das Leben kostete, geradezu harmlos: Immerhin haben ja allerlei grüne Pflanzen, Insekten und etliches mehr überlebt. Als aber vor mehr als 3,8 Milliarden Jahren das Sonnensystem noch längst nicht so aufgeräumt war wie heute, hat ungefähr alle paar hundert Millionen Jahre die Hitzewelle eines kosmischen Geschosses unseren Planeten so wirksam sterilisiert, dass von irgendwelchem Leben auf der Oberfläche oder im Meer – und vom Meer überhaupt – nichts mehr übrig blieb. Gleichwohl gab es – so der Fossilbefund – relativ bald nach dem Ende des letzten kosmischen Bombardements die ersten primitiven Lebensformen.

Wenn also die Entstehung des Lebens aus der „Ursuppe“ so schnell geht: Vielleicht gab es ja mehrere Anläufe, die jeweils durch eine kosmische Katastrophe zunichte gemacht wurden? Oder vielleicht geht es doch nicht so schnell, bis die für

einen lebenden Organismus erforderliche Komplexität zusammenkommt; vielmehr ist das Oberflächenleben, wie es uns als der Normalfall erscheint, gar nicht das ursprüngliche, und Bakterien, Pflanzen und Tiere stammen von den Extremophilen ab, jenen Einzellern, die sich in kochender, konzentrierter Schwefelsäure am wohlsten fühlen oder unter einer kilometerdicken Gesteinsdecke ihre Lebensenergien aus der Reaktion von Schwefelverbindungen beziehen (Spektrum der Wissenschaft 12/1996, S. 66)? Dort unten hätten sie auch einen größeren Meteoriteneinschlag heil überstanden. Oder die zähen Wesen stammen vom Mars oder sonstwoher, reisten, durch einen hinreichend dicken Gesteinsmantel geschützt, selbst in einem Meteoriten und besiedelten von innen nach außen die Erde? Vielleicht schwirren ja überall primitive Lebensformen im Weltraum umher („Panspermie")?

Lebensentstehungs-Romantik

Paul Davies, Professor für mathematische Physik in Adelaide (Australien) und Autor zahlreicher Sachbücher, spekuliert gern; und die Fakten sind so mager, dass sie dafür reichlich Raum lassen. Aber Davies ist ein ehrlicher Spekulierer. Er zitiert ausführlich die konkurrierenden Theorien; er gibt auch offen zu, dass die Panspermie-Theorie nicht mehr Argumente für sich hat als andere und vor allem die entscheidende Frage „Wie entstand das Leben?" nicht beantwortet, sondern nur verlagert.

Aber sie hat seine offen bekundete Sympathie, und zwar gerade, weil sie – in seinen Augen – der klassischen darwinistischen Ideologie, nach der das ganze irdische Leben Produkt des blinden Zufalls ist, nicht in den Kram passt. Davies wünscht sich, dass es eine den Naturgesetzen innewohnende Tendenz zur Entstehung von Leben gibt. „Und dann gibt es den anderen Standpunkt, sicher romantisch und vielleicht dennoch wahr: die Vision eines sich selbst organisierenden, sich selbst komplexifizierenden Kosmos, regiert von Gesetzen, die Materie ermutigen, sich zu Leben und Bewusstsein zu entwickeln. Ein Universum, in dem die Entstehung denkender Wesen Teil und Inhalt des großen Schemas ist. Ein Universum, in dem wir nicht allein sind."

Bei allem Sinn für Romantik: Ich fürchte, diese Wunschvorstellung verschwimmt bei genauerer Nachprüfung bis zur Unkenntlichkeit. Auch Davies ist nicht so naiv zu glauben, es gebe eine der Natur innewohnende Tendenz zu luftatmenden, zweifüßigen und zweihändigen denkenden Wesen. Sehr viel von unse- ▶

PREISRÄTSEL

Jannis' Weide

von Pierre Tougne

Bauer Jannis aus Griechenland ist stolzer Besitzer eines Apfel-, eines Birn- und eines Zitronenbäumchens, die nicht in einer geraden Linie stehen. Seine Rinder stammen von der Herde des mathematikbegeisterten Sonnengottes ab (siehe Seite 114); daher muss er ihnen eine Weide in Form eines gleichseitigen Dreiecks oder eines Quadrats abstecken. Dabei würde er die Bäume gern als Pfosten mitverwenden. Beim Quadrat sollte ein Baum in einer Ecke stehen, während die beiden andern an den gegenüberliegenden Seiten den Weidezaun halten (siehe oben).

Helfen Sie Jannis bei der Konstruktion der beiden regelmäßigen Polygone.

Nach landesüblichem Brauch darf er nur Pflöcke und Schnüre verwenden; damit kann er um einen feststehenden Pflock eine kreisförmige Furche ziehen oder – mit Hilfe seiner Handlanger – eine Schnur beliebiger Länge so spannen, dass sie zwei vorgegebene Pflöcke berührt. Wo zwei Schnüre, zwei Furchen oder Furche und Schnur sich kreuzen, darf er einen Pflock einschlagen.

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D–69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Bücher „Planeten und ihre Monde". Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 16. Januar 2001, eingehen.

Lösung zu „Das Labyrinth von Kröta " (November 2000)

Quako braucht 28 Sprünge, um aus dem Labyrinth zu gelangen. Er springt den vierten, achten, zwölften sowie den neunzehnten Sprung rückwärts und alle anderen vorwärts. Dies ist die einzige Lösung mit dieser geringen Anzahl an Sprüngen.

Jens Mauersberger aus Karlsbad empfahl Quako, sich nicht durch Probieren unkalkulierbaren Risiken auszusetzen, sondern anstelle seiner selbst virtuelle Frösche springen zu lassen. Mit einem rekursiven Algorithmus in Java wird die Flucht wie folgt geplant:

Auf jedem der Felder sitzen so viele Fliegen, wie die Zahl darauf angibt. Ein virtueller Frosch frisst diese auf und klont sich einmal. Die beiden Frösche betreiben fortan Synchronspringen: Sie springen zunächst so viele Felder vor beziehungsweise zurück, wie sie soeben Fliegen gefressen haben. Im nächsten Zeittakt wiederholt sich das Spiel mit einer größeren Zahl oder auch geringeren Anzahl von Fröschen.

Kommt einer der Frösche auf ein fliegenloses Feld, so ist ihm einer seiner Zwillingsbrüder zuvorgekommen, und er muss verhungern. Offensichtlich war sein Weg nicht der schnellste. Frösche, die übermotiviert über das Ziel hinaushüpfen, scheiden ebenso aus wie diejenigen, die im Eingang der in freudiger Erwartung harrenden Prinzessin ins Gesicht springen.

Der virtuelle Frosch, der als erster das Ziel erreicht, muss nun nur noch Quako seinen Weg mitteilen (und ist noch eine ganze Weile mit der Verdauung sehr vieler Fliegen beschäftigt).

Die Gewinner der fünf Flüssigkeitsthermometer „Galilei" sind Peter Uelkes, Mönchengladbach; Eckhard Geißel, Kiel; Lothar Kiefer, Bietigheim; Sezayi Işbilir, Erlangen; und Michael Baldus, Möhnesee.

Lust auf noch mehr Rätsel? Auf der Website von Spektrum der Wissenschaft (www.spektrum.de) finden Sie jeden Monat in der Rubrik „Rätsel" eine neue mathematische Knobelei.

rer gegenwärtigen Erscheinungsform ist unbestritten vom Zufall bestimmt. Was bleibt, ist allenfalls eine Tendenz zu Leben in einem sehr abstrakten Sinne, definiert durch organisierte Komplexität, Vermehrungs- und Anpassungsfähigkeit.

Damit wird der prinzipielle Unterschied zu einem graduellen: Wurde unsere Existenz durch mehr oder weniger Zufall bestimmt? Oder noch paradoxer: Vermutlich sind die von Davies postulierten Gesetze jenseits der Physik, welche die Entstehung von Leben begünstigen, ihrerseits durch den Zufall begründet, etwa so: Ein hinreichend reichhaltiges System wie zum Beispiel die frühe Erde nimmt rein durch Zufall aus den unüberschaubar vielen physikalisch möglichen Zuständen eine repräsentative Auswahl tatsächlich an – darunter auch die verschwindend wenigen Zustände, die zur Selbstvermehrung fähig sind und sich zu lebenden Organismen weiterentwickeln können.

Einerlei: Das Buch ist eine äußerst anregende Mischung aus Wissenschaft und Spekulation – auch wenn ich seinen zentralen philosophischen Gedanken nicht folgen kann.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



DROGENPOLITIK

Bernulf Kanitscheider (Hg.)

Drogenkonsum – bekämpfen oder freigeben?

Hirzel, Stuttgart 2000. 254 Seiten, DM 56,–

Dieser Sammelband enthält in einem knappen Dutzend Beiträge geballte theoretische Substanz, und am Ende sogar eine Antwort auf die im Titel gestellte Frage. Günter Amendt, ein Altmeister der Drogendiskussion, schreibt: „Der dauerhafte exzessive Konsum von psycho-aktiven Substanzen ist höchst riskant, daran kann kein Zweifel bestehen. Wer abstürzt und in einen Suchtkreislauf gerät, zahlt einen hohen Preis. Doch die Bereitschaft der Subjekte, Risiken in Kauf zu nehmen, ist gewachsen – und sie wird weiter wachsen. Deshalb wird die Erziehung zur Drogenmündigkeit und die Befähigung zum Risikomanagement zu einer der wichtigsten Aufgaben einer realitätsgerechten Präventionspolitik werden."

Aber bis zu dieser klaren Aussage sind 198 Seiten Text sehr unterschiedlicher Qualität abzuarbeiten. Wenig ergiebig sind Beiträge zum Drogenkonsum in unterschiedlichen historischen Gesellschaften und zum Koka- und Kokaingeschäft in Bolivien, die zum Titelthema wenig beitragen, sowie hoch wissenschaftliche, mit Fußnoten überladene Texte zur Biologie und Psychologie des Drogenkonsums. Lorenz Böllinger versucht die Rechtfertigung des Betäubungsmittelstrafrechts nicht nur mit nachvollziehbaren Argumenten, sondern abschließend mit merkwürdigen Gedanken über die angebliche Unschädlichkeit der Drogen bis hin zur „Selbstheilung" der Heroinabhängigen in Frage zu stellen.

Dagegen hat Artur Kreuzer, einer der bedeutendsten Drogenrechtsexperten, eine seiner vielen hervorragenden Arbeiten abgeliefert. Er gibt auch Antworten auf Fragen, die im Kontext der Drogenfreigabe nicht so gern gestellt werden. So haben von 100 von ihm untersuchten straffällig gewordenen Drogenkonsumenten 65 eine Drogenkarriere erst im späteren Verlauf einer ausgeprägten Delinquenz-Karriere entwickelt. In der Mehrzahl der Fälle ist also nicht die Kriminalität Folge des Drogenkonsums, sondern es besteht erst ein strafrechtliches und dann ein Drogenproblem. Kreuzer relativiert auch den so häufig wiederholten Hinweis auf Nachbarländer, die wesentlich mehr Erfolg im Umgang mit den Drogenproblemen hätten. Bemerkenswerterweise hatten die liberale Drogenpolitik in den Niederlanden und die zumindest bis 1998 in der Bundesrepublik stärker repressiv orientierte Drogenpolitik annähernd gleiche Konsequenzen. Insbesondere war die repressiv ausgerichtete Strategie nicht erfolgreicher als eine moderate.

Zunächst akzeptieren, was ist

Günter Amendts pragmatische Urteile über Drogen und Drogenpolitik haben in der Vergangenheit häufig Aufsehen erregt, wenn er sagte, was ist: Drogen werden konsumiert, und man muss das zunächst akzeptieren. „Die Konsumenten und Konsumentinnen von Drogen werden als Menschen wahrgenommen, die krank und grundsätzlich auf Hilfe von außen angewiesen sind". Diese Wahrnehmung ist mittlerweile glücklicherweise überholt. Aber von der falschen Aussage kommt er zur richtigen und hoch aktuellen Schlussfolgerung: Zu fordern sind eine Erziehung zur Drogenmündigkeit und ein Risikomanagement im Sinne einer neu orientierten Präventionspolitik. Amendt spricht wichtige Wahrheiten aus: Im Trend der Globalisierung werden auch die Drogengeschäfte globalisiert und damit immer weniger kontrollierbar. Oder: Das so genannte Drogenproblem ist ein Ausdruck gigantischer gesellschaftlicher Fehlentwicklungen, ein Resultat falscher Analysen und Folge einer Blickverengung auf jeweils nur einen bestimmten Aspekt des Problems. Recht hat er und legt am Schluss kurz und pragmatisch seine Vorschläge zu Maximen einer vernünftigen Drogenpolitik dar.

Schade nur, dass der Herausgeber sich selbst mit einem Beitrag noch an den Schluss des Buches gesetzt hat. Teilweise wirken seine Ausführungen (etwa über den „vierten Trieb") wie Wiederholungen des Vorangegangenen, teilweise sind sie nicht nachzuvollziehen („obwohl Tee und Marihuana gleichermaßen harmlos sind, ist der erste erlaubt, das zweite verboten"), und Aussagen wie die, dass „die Drogenpolitik nicht in erster Linie von der Sorge um die Volksgesundheit geleitet ist, sondern als Instrument der Diskriminierung von Randgruppen eingesetzt wird", lassen auf einen kleinen Verfolgungswahn und geringe Kenntnis politischer Sachverhalte schließen. Der von ihm und anderen Autoren verfolgte Ansatz, Drogenkonsum in die Entscheidung jedes Einzelnen zu stellen, verkennt, dass dieser Drogenkonsum stets in kommunizierenden Systemen stattfindet und damit andere Menschen sozial, materiell oder psychisch beeinträchtigen kann.

Neben den erwähnten inhaltlichen Highlights bleibt das schale Gefühl, vieles schon einmal gelesen zu haben. Die Hoffnung des Herausgebers, dass Leserinnen und Leser zu einem fundierten Urteil über eine brennende soziale und ethische Frage gelangen, wird unerfüllt bleiben: Zu viele Aspekte fehlen, und aus dem Potpourri darf sich jeder das heraussuchen, was seine (Vor-)Urteile stützt.

Jost Leune

Der Rezensent ist Geschäftsführer des Fachverbandes Drogen und Rauschmittel e.V. in Hannover. Der Fachverband ist ein Interessenverband von 60 Trägern von Suchthilfeeinrichtungen in Deutschland mit rund 200 angeschlossenen Einrichtungen.

1901

Gesundes Strassenpflaster

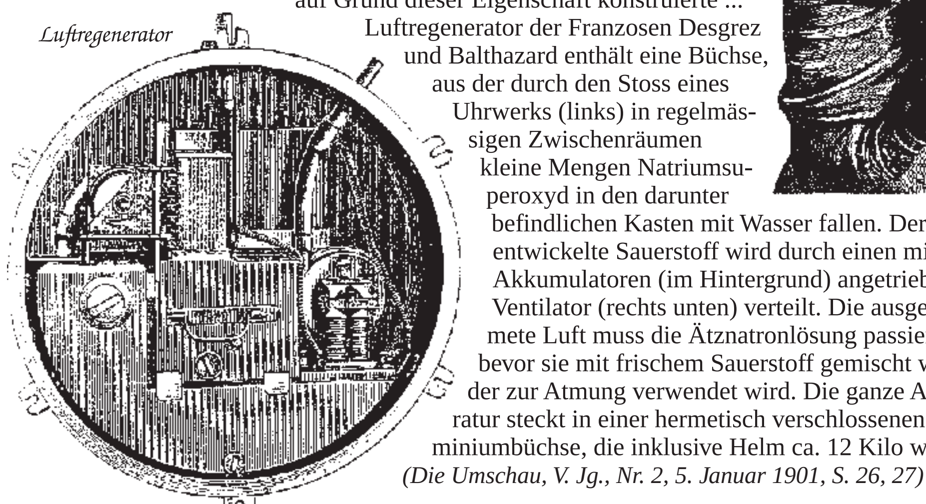
Auf verschiedene Pflaster wurde je ein Dreifuss gesetzt, der in $1^1/_2$ Meter Höhe über dem Boden ein sterilisirtes Häutchen trug, das für ... 10 Minuten dem Strassenstaub ausgesetzt wurde, neben diesem Apparate wurde noch ein Anemometer gesetzt, um die Windgeschwindigkeit zu messen. Der Wind nämlich spielt eine sehr bedeutende Rolle in der Verbreitung der Keime, und aus diesem Grunde wird ein besonders glattes Pflaster in gesundheitlicher Beziehung am Ungünstigsten sein, weil es dem Winde am Leichtesten gestattet, den Sand mit den darin enthaltenen Keimen in die Luft zu wirbeln. In dieser Hinsicht bietet der Schichtasphalt die grössten Nachtheile. *(Zeitschrift für Transportwesen und Strassenbau, Beilage, XVIII. Jg., 1901, No. 2, S. 31)*

Wellenschlag betreibt Leuchtboje

Die Boje ist so construirt, daß schon ein geringer Wellenschlag genügt, um die zur Erzeugung der vorschriftsmäßigen Lichtstärke nöthige Elektricität zu erzielen. Durch ein Uhrwerk im Inneren der Boje wird das Aufflammen und Verlöschen des Lichtes, das jede halbe Minute wechselt, genau geregelt. *(Der Stein der Weisen, 26. Bd., 1901, S. 64)*

Vorrichtung zum Atmen unter Wasser

Natriumsuperoxyd ... hat die Eigenschaft, in Wasser geworfen, Sauerstoff auszuscheiden und gleichzeitig eine Lösung von Ätznatron zu bilden. Der auf Grund dieser Eigenschaft konstruierte ... Luftregenerator der Franzosen Desgrez und Balthazard enthält eine Büchse, aus der durch den Stoss eines Uhrwerks (links) in regelmäsigen Zwischenräumen kleine Mengen Natriumsuperoxyd in den darunter befindlichen Kasten mit Wasser fallen. Der entwickelte Sauerstoff wird durch einen mit Akkumulatoren (im Hintergrund) angetriebenen Ventilator (rechts unten) verteilt. Die ausgeatmete Luft muss die Ätznatronlösung passieren, bevor sie mit frischem Sauerstoff gemischt wieder zur Atmung verwendet wird. Die ganze Apparatur steckt in einer hermetisch verschlossenen Aluminiumbüchse, die inklusive Helm ca. 12 Kilo wiegt. *(Die Umschau, V. Jg., Nr. 2, 5. Januar 1901, S. 26, 27)*



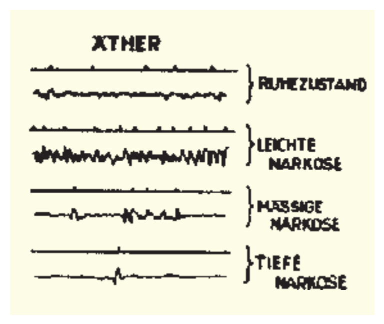


Deutsche Forschungsgemeinschaft gegründet

Der Deutsche Forschungsrat und der Hauptausschuß der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft kamen auf einer gemeinsamen Sitzung am 17. Januar in Stuttgart überein, Forschungsrat und Notgemeinschaft zu einer einheitlichen Organisation unter dem schon bisher für ihre Zusammenfassung gebrauchten Namen der „Deutschen Forschungsgemeinschaft“ zu verschmelzen. ... Ihr Ziel ist die ideelle und materielle Förderung der deutschen Wissenschaft als einer alle ihre Zweige umschließenden Einheit und die Pflege ihrer Zusammenarbeit mit dem Staat und allen übrigen politischen und gesellschaftlichen Faktoren im In- und Ausland. *(Deutsche Universitätszeitung, 6. Jg., Heft 2, 26. Januar 1951)*

Narkose-Steuerung durch Hirnwellen

Die während des Schlafes oder in der Narkose ausgeschickten Hirnwellen unterscheiden sich erheblich von den „Wachwellen“. Dieser Unterschied wird in einem Narkose-Kontrollapparat ausgenutzt, der von Reginald E. Bickford entwickelt und kürzlich ... vorgeführt wurde. Das Gerät kontrolliert mit Hilfe der ausgesandten Gehirnwellen nicht nur die Tiefe der Narkose, sondern die Wellen steuern auch die Zuführung des Narkose-Präparates in der Weise, daß mit der Schwächung der Hirnwellen, die ein Maß für die Tiefe der Narkose ist, zugleich die Zuführung des Narkosemittels verlangsamt und bei Erreichen einer bestimmten Wellenintensität abgestopt wird. *(Orion, 6. Jg., 1951, S. 37)*



Hirnwellen eines Affen

Neues zur Meteorologie des Mars

Eine interessante Diskussion der von unserem Nachbarplaneten bekannten Daten ... vom meteorologischen Standpunkt aus liefert zahlreiche Parallelen, aber auch Unterschiede gegenüber unserem eigenen Planeten... Zwei voneinander unabhängige Bestimmungen ergaben übereinstimmend einen Luftdruck am Boden von 80 mb (Erde 1013 mb). ... Unter der Annahme nahezu adiabatischen Temperaturgefälles sind Druck und Dichte der Marsatmosphäre in 26 bis 28 km Höhe gleich der irdischen. ... Die regionale Verteilung der Mittagstemperaturen ergibt zur Zeit des Winters der nördlichen Marshemisphäre einen Gürtel maximaler Bodentemperatur (+20 bis +30°) in etwa 20° Südbreite, mit steilem Abfall zum vereisten Nordpol, aber nur schwachem Abfall zum sommerlich warmen Südpol. *(Naturwissenschaftliche Rundschau, 4. Jg., Heft 1, Januar 1951, S. 26)*

Die Rinder des Sonnengottes

Die Herde hätte auf der ganzen Erde keinen Platz gefunden: Immerhin ist die Anzahl der göttlichen Rindviecher eine Zahl mit 206 545 Stellen.

VON IAN STEWART

Der englische Puzzleerfinder Henry Ernest Dudeney kleidet in seinem Buch „Amusements in Mathematics" von 1917 eine Aufgabe in eine fantasievolle Geschichte über die Schlacht von Hastings, jenen berühmten Kampf, in dem 1066 die Normannen unter Wilhelm dem Eroberer die Sachsen unter König Harald besiegten und fortan die Geschicke Englands bestimmten. Nach Dudeney schildert eine alte Chronik: „Haralds Mannen standen tapfer zusammen und bildeten 61 Quadrate mit gleich vielen Recken in jedem Quadrat … Als Harald sich in die Schlacht warf, bildeten die Sachsen mit ihm zusammen ein einzig mächtiges Quadrat von Männern." Wie groß, so fragte Dudeney, war also die kleinstmögliche Anzahl von Männern in König Haralds Armee?

Mathematisch formuliert suchen wir also eine Quadratzahl, die mit 61 multipliziert und um 1 erhöht wieder eine Quadratzahl ergibt. Das heißt, wir suchen ganzzahlige Lösungen der Gleichung $y^2=61x^2+1$. Dies ist ein Beispiel einer so genannten Pellschen Gleichung, benannt nach dem englischen Mathematiker John Pell (1610–1685), der selbst nichts Wesentliches zu dem Gebiet beigetragen hat; aber solche Fehlbenennungen sind in der Mathematik häufig. Anstelle der 61 darf irgendeine andere positive ganze Zahl stehen, die keine Quadratzahl ist. Derartige Gleichungen haben stets unendlich viele Lösungen. Man berechnet sie mit dem so genannten Kettenbruchverfahren, das in Lehrbüchern der Zahlentheorie beschrieben ist.

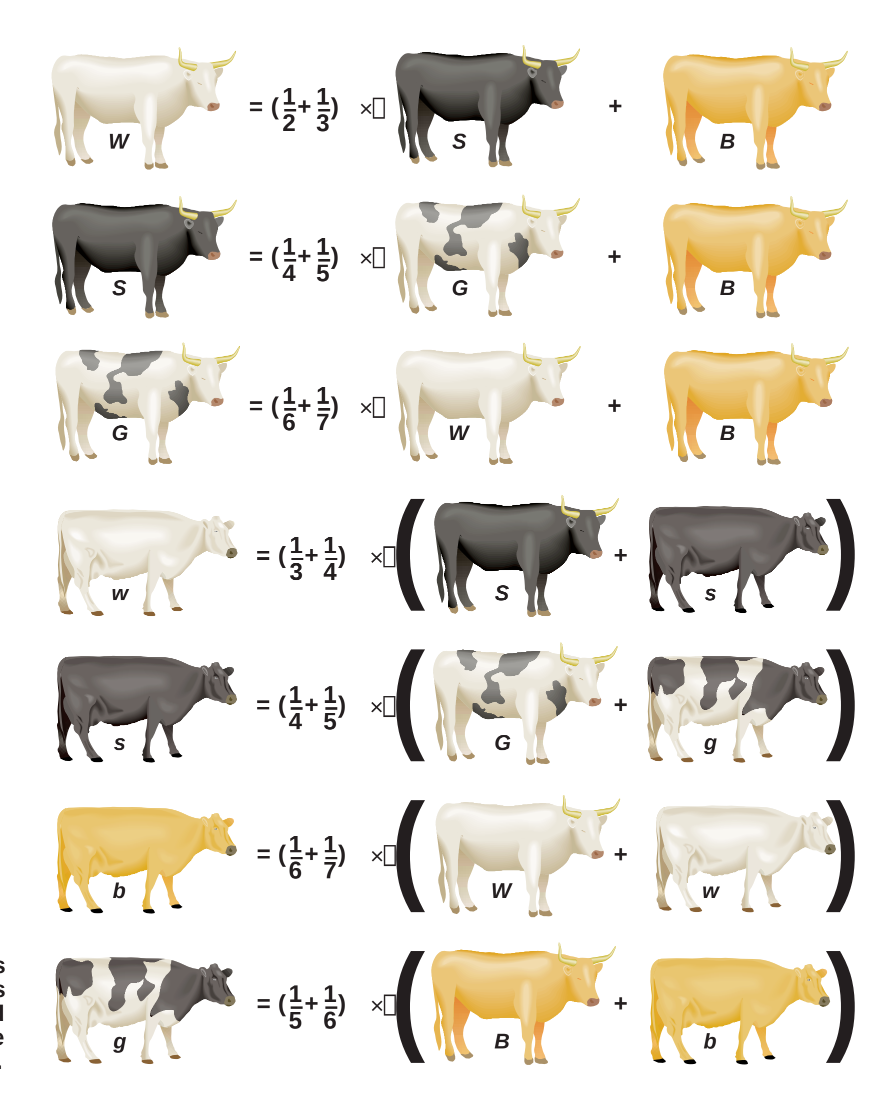
Zum Aufwärmen betrachten wir die weniger bekannte Schlacht von Brighton, in der unter im Übrigen gleichen Umständen Haralds Leute 11 Quadrate bildeten (Bild auf der nächsten Seite). Die Gleichung lautet nun $y^2=11x^2+1$, und mit etwas Probieren findet man die kleinste Lösung: $x=3$ und $y=10$.

Für Dudeneys ursprüngliches Rätsel wird Probieren nicht funktionieren, es sei denn vielleicht auf einem Computer; denn die kleinste mögliche Lösung ist $x=226\,153\,980$, $y=1\,766\,319\,049$. Wenn man den Wert des Koeffizienten D in der allgemeinen Pellschen Gleichung $y^2=Dx^2+1$ variiert, können die jeweils kleinsten Lösungen wild umherspringen. Die „schwierigen" Werte von D unter 100, das heißt die, bei denen das kleinstmögliche x größer als 1000 ist, sind $D=29$, 46, 53, 58, 61, 67, 73, 76, 85, 86, 89, 93, 94 und 97. Der bei weitem schwierigste unter ihnen ist $D=61$, Dudeney hat also eine gute Wahl getroffen. Mit etwas Anstrengung sollten Sie herausfinden, wie es für die beiden Nachbarwerte $D=60$ und $D=62$ aussieht. Die Antworten finden Sie am Ende dieses Artikels.

Aber seien Sie froh! Dudeney hätte sein Puzzle noch viel schwieriger machen können. Bei $D=1597$ sind die kleinsten Lösungen für x und y ungefähr $1{,}3\times10^{46}$ und $5{,}2\times10^{47}$. Und $D=9781$ ist noch schlimmer.

Das Problem des Archimedes…

Die Pellsche Gleichung ist auch der Schlüssel zur Lösung eines viel berühmteren Problems. Im Jahre 1773 entdeckte der deutsche Dramatiker Gotthold Ephraim Lessing ein Manuskript mit dem Problem, das in ein Gedicht gekleidet war: 22 Paare elegischer Verse, die angeblich der griechische Mathematiker Archimedes von Syrakus um 250 vor Christus geschrieben und an Eratosthe-



Beim Rätsel des Archimedes zur Anzahl der Rinder des Sonnengottes müssen die Anzahlen der Stiere und Kühe der verschiedenen Farben diese sieben Gleichungen erfüllen.

nes von Kyrene, den Vorsteher der Bibliothek von Alexandria und Namensgeber des Primzahlsiebs, gesandt hatte. Es beginnt: „Bist Du, oh Fremder, fleißig und weise, so berechne die Zahl der Rinder des Sonnengottes, die einst grasten auf den Feldern des tyrrhenischen Eilands Sizilien."

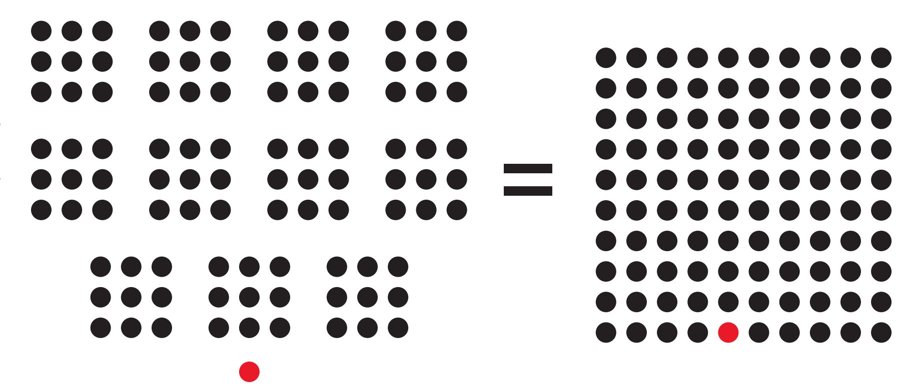
Auch Homer erwähnt die Rinder des Sonnengottes Helios in seiner „Odyssee" und gibt ihre Zahl mit 350 an. Archimedes dachte offenbar in größeren Dimensionen. Nach seinem Rätsel besteht die Herde aus weißen (W), schwarzen (S), braunen (B) und gefleckten (G) Stieren sowie entsprechend gefärbten Kühen (w, s, b und g). Die Anzahl der Tiere wird durch sieben leicht zu erfüllende Bedingungen und zwei schwierige festgelegt. Die leichten Bedingungen lassen sich durch sieben Gleichungen in den acht Unbekannten ausdrücken (Bild auf der vorigen Seite). Die erste schwierige Bedingung verlangt, dass die Gesamtzahl $W+S$ der weißen und schwarzen Stiere eine Quadratzahl sein muss. Nach der zweiten muss die Gesamtzahl $B+G$ der braunen und der gefleckten Stiere eine Dreieckszahl sein, also eine Summe $1+2+3+\ldots+m$ für irgendeine natürliche Zahl m oder, was dasselbe ist, eine Zahl der Form $m(m+1)/2$.

Die ersten sieben Bedingungen laufen alle auf eine einzige hinaus: Alle acht Unbekannten sind in festgelegten Verhältnissen zueinander proportional. Mit einer noch zu bestimmenden natürlichen Zahl n gilt:

$$W=10\,366\,482\,n,\ S=7\,460\,514\,n,$$
$$B=4\,149\,387\,n,\ G=7\,358\,060\,n,$$
$$w=7\,206\,360\,n,\ s=4\,893\,246\,n,$$
$$b=5\,439\,213\,n,\ g=3\,515\,820\,n$$

Jetzt geht es darum, die kleinste natürliche Zahl n zu finden, für die auch die beiden schwierigen Bedingungen erfüllt sind. Im Jahre 1830 löste der deutsche Mathematiker J. F. Wurm das Rätsel unter Missachtung der Bedingung, dass $W+S$ eine Quadratzahl sein soll. Die verbleibende Forderung, dass $B+G$ eine Dreieckszahl sein muss, führt nach einigen algebraischen Umformungen auf die Bedingung, dass $92\,059\,576\,n+1$ eine Quadratzahl sein muss. Setzen wir den kleinsten Wert von n ein, für den das der Fall ist, so ergibt sich für den Sonnengott eine relativ bescheidene Herde von 5 916 837 175 686 Tieren.

Aber Wurms Gleichung hat Lösungen für unendlich viele n, und unter ihnen gilt es nun die kleinste zu finden, die auch die letzte noch offene Bedingung ($W+S$ ist eine Quadratzahl) erfüllt. Der deutsche Mathematiker A. Amthor bewies 1880, dass n die Form $4\,456\,749\,m^2$ hat, wobei m eine Pellsche Gleichung erfüllen muss: $410\,286\,423\,278\,424\,m^2+1$ muss eine Quadratzahl sein.



Die Armee aus 99 Soldaten (schwarze Punkte) und König Harald (roter Punkt) lässt sich in 11 Quadrate, angeführt von Harald, aufteilen (links), oder sie kann zusammen mit Harald ein einziges Quadrat bilden (rechts).

… ist theoretisch gelöst

Im Prinzip kann man das kleinste solche m mit einem Kettenbruchverfahren finden. Die Berechnungen überstiegen die technischen Möglichkeiten Amthors; immerhin fand er heraus, dass die Größe der Herde eine Zahl mit 206 545 Stellen ist, und konnte die ersten vier Stellen berechnen. Zwischen 1889 und 1893 berechnete der Mathematische Club in Hillsboro (Illinois) die ersten 32 Stellen, von denen 30 sich später als richtig herausstellten. Mathematiker an der Universität von Waterloo in Ontario (Kanada) fanden 1965 die erste vollständige Lösung. Als 1981 Harry L. Nelson sämtliche 206 545 Stellen veröffentlichte, war die dafür benötigte Rechenzeit (auf einer CRAY-1) bereits auf zehn Minuten geschrumpft.

Das war bis vor kurzem der Stand der Dinge. Moderne ultraschnelle Computer erledigen arithmetische Berechnungen mit Hunderttausenden von Stellen in einem Augenblick. Ilan Vardi vom Occidental College in Los Angeles (Kalifornien) stellte fest, dass das Software-Paket „Mathematica" (Spektrum der Wissenschaft 2/2000, S. 100) die beschriebene Analyse in wenigen Sekunden komplett nachvollziehen konnte. Mit etwas mehr Aufwand produzierte Mathematica für die Größe der Herde auch eine explizite Formel – deren Existenz man gar nicht vermutet hatte. Auf einer Sun-Workstation – einem angemessenen Arbeitsgerät, wenn man den Eigner der Herde bedenkt – dauerte die Berechnung eineinhalb Stunden. Die Größe der Herde ist die kleinste natürliche Zahl, welche die Zahl

$$(p/q)(a+b\sqrt{4\,729\,494})^{4658}$$

übertrifft. Dabei ist

$p=25\,194\,541$,
$q=184\,119\,152$,
$a=109\,931\,986\,732\,829\,734\,979\,866\text{-}232\,821\,433\,543\,901\,088\,049$,
$b=50\,549\,485\,234\,315\,033\,074\,477\text{-}819\,735\,540\,408\,986\,340$.

Man fragt sich natürlich, ob wirklich Archimedes dieses Problem gestellt hat. Die allgemeine Meinung ist ja, aber möglicherweise hat er das Gedicht nicht geschrieben. Mit Sicherheit konnte Archimedes das Rätsel nicht lösen; dafür ist die Lösung einfach zu groß. Rechnungen mit der Hand hätten viel zu lange gedauert. Aber wusste Archimedes, dass es eine Lösung gibt? Wahrscheinlich nicht. Er war sicher klug genug, eine Gleichung aufzustellen, aber er kann kaum gewusst haben, dass eine solche Gleichung immer eine Lösung hat.

Die Moral von der Geschicht': Hüte dich vor den Griechen, wenn sie Rätsel stellen.

Lösungen: Für $D=60$ ist $x=4$, $y=31$. Für $D=62$ ist $x=8$, $y=63$. ■

***Ian Stewart** ist Professor für Mathematik an der Universität von Warwick in Coventry (England).*

Literaturhinweise

Archimedes' Cattle Problem. Von Ilan Vardi in: American Mathematical Monthly, Bd. 105, S. 305, April 1998.

Einführung in die elementare Zahlentheorie. Von Friedrich Schwarz. Teubner, Stuttgart 1998.

Sicherungsetiketten

Ladendiebstähle fügen dem Einzelhandel herbe Verluste zu – allein in Deutschland sind es pro Jahr fast fünf Milliarden Mark. Als wirksamste Waffe gegen Diebe gelten elektronische Warensicherungssysteme, die je nach Technik als radiofrequent, elektromagnetisch oder akustomagnetisch bezeichnet werden. Alle drei Techniken beruhen auf der gleichen Idee: Schleusen am Ladenausgang erzeugen elektromagnetische Felder, die Sicherungsetiketten an den Waren anregen. Diese senden nun ihrerseits ein Signal. Antennen im Boden oder in den Schleusen nehmen es auf, eine Elektronik löst gegebenenfalls einen Alarm aus. Die Etiketten von bezahlter Ware werden an der Kasse entfernt oder deaktiviert.

Die ältere Radiofrequenz-Technik arbeitet – im Grunde nicht anders als ein Radio – mit elektrischen Schwingkreisen. Weil die aber relativ groß sind, werden RF-Systeme immer seltener eingesetzt. Elektro- und akustomagnetische Systeme verwenden Metallstreifen als Sensorelemente und lassen sich entsprechend kleiner bauen. Beide nutzen die Reaktionen von Metallen auf magnetische Felder.

Akustomagnetische Systeme gibt es seit etwa zwölf Jahren. Weil sie seltener Fehlalarme verursachen, setzen sie sich immer mehr durch. Das Sicherungsetikett besteht aus einer kleinen weißen Kunststoffbox und ist etwa 40 Millimeter lang, je nach Ausführung 8 bis 14 Millimeter breit und nur knapp einen Millimeter hoch. Darin befindet sich frei beweglich gelagert ein dünner Streifen amorphen Metalls sowie ein hartmagnetischer Metallstreifen, mit dem sich das Etikett ein- und ausschalten lässt. Ersterer ist „magnetostriktiv“, das heißt, er verändert unter dem Einfluss eines Magnetfeldes seine Länge. In einem Wechselfeld beginnt dieses Plättchen deshalb zu schwingen, besonders stark bei der Resonanzfrequenz. Es erzeugt nun seinerseits ein Magnetfeld – und damit das Signal.

Im Schleusenbereich der AM-Systeme wird ein magnetisches Wechselfeld von 58 Kilohertz alle 20 Millisekunden zwei Millisekunden lang eingeschaltet. Wie eine Stimmgabel nach dem Anstoßen weiterschwingt, vibriert auch das amorphe Metall in der Feldpause. Ohne störendes Hintergrundrauschen kann die Auswerteelektronik sein Signal in dieser Zeit besser entdecken. Kristalline Metalle – etwa Eisen in einer Armbanduhr –, die vielleicht ebenfalls zum Schwingen angeregt wurden, verstummen in der Feldpause und können deshalb keinen Fehlalarm auslösen.

Das erwähnte hartmagnetische Plättchen verändert die Resonanzfrequenz des amorphen Streifens. Wird es nach dem Bezahlen der Ware magnetisiert, vermag der Sensor nicht mehr auf das Erregersignal der Sicherungsschleuse zu reagieren. Wer bezahlt hat, darf anschließend unbehelligt den Laden verlassen. ■

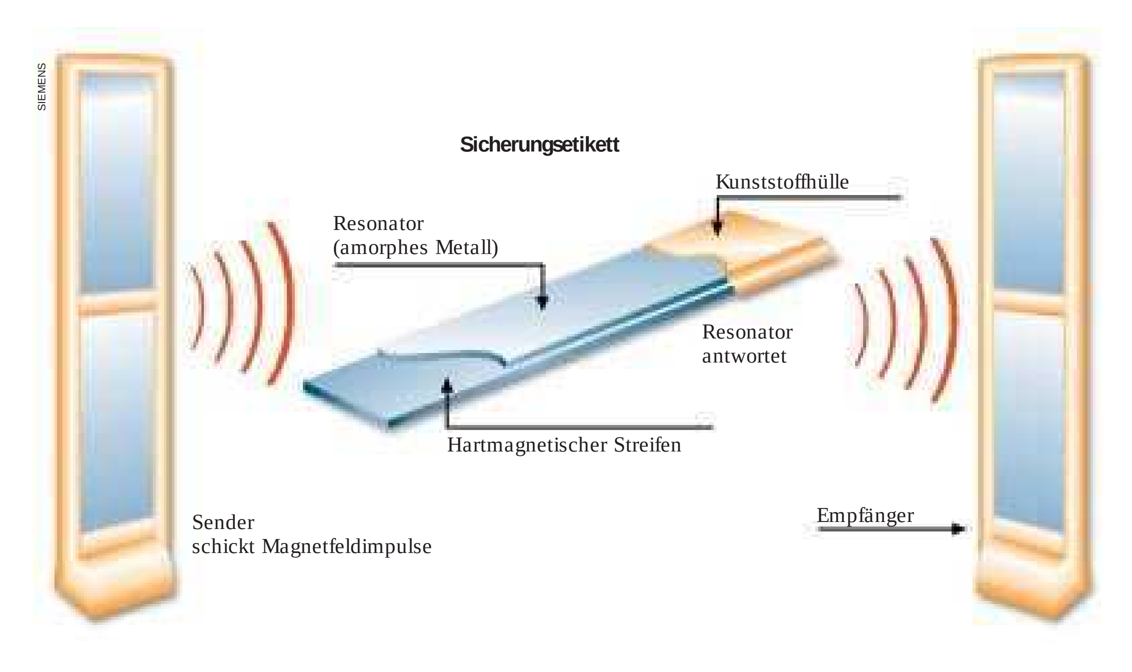
Ulrike Zechbauer ist Wissenschaftsjournalistin und lebt in München. Die Redaktion dankt dem Fachgebiet Logistik an der Universität Dortmund für fachliche Unterstützung.

Amorphe Metalle

In herkömmlichen Metallen sind Atome streng regelmäßig in einem Kristallgitter angeordnet. Die Atome amorpher Metalle bilden hingegen keine solche Ordnung aus, ähnlich wie die in einer Flüssigkeit oder Schmelze. Sie lassen sich dadurch sehr viel leichter ummagnetisieren und eignen sich als aktive Komponenten von Sicherungsetiketten (rechts).



VAKUUMSCHMELZE, HANAU



Klein und unscheinbar, aber hocheffektiv: akusto-magnetische Sicherungsetiketten werden in der Schleuse zur Schwingung angeregt. Antennen, meist ebenfalls in der Schleuse untergebracht, erkennen das Signal und geben Alarm.



Kosmischer Staub

Sie sind hundertmal kleiner als gewöhnlicher Hausstaub und haben doch die Entwicklung unseres Milchstraßensystems nachhaltig beeinflusst: winzige Materieteilchen, die im schier endlosen Raum zwischen den Sternen driften.

Ichtyosaurier – Herrscher der Meere im Jura

Was Dinosaurier zu Land, waren Ichtyosaurier im Ozean. Erst jetzt können Wissenschaftler ihre Vorherrschaft erklären.

Das kälteste Gas der Welt

Bis vor kurzem waren Bose-Einstein-Kondensate pure (Quanten-)Theorie. Jetzt werden diese exotischen Objekte in mehreren Labors routinemäßig und experimentell erforscht.

Wer waren die ersten Amerikaner?

Es galt als sicher: Fellbekleidete Jäger wanderten im Gefolge von Mammutherden über die heute versunkene Beringlandbrücke nach Amerika ein. Neuere archäologische Funde deklassieren dieses Standardmodell als nur eines unter mehreren. Jagden die ersten Amerikaner Fische statt Mammuts?



Computergenerierte Pflanzenbilder

Datenstrukturen, die den Aufbau einer Pflanze getreu nachbilden, und ein bisschen Zufall ergeben täuschend echte Bilder, bis hin zu ganzen Blumenwiesen.

Weitere Themen im Februar

Gene, Muskeln und Sport

Das beste Training verhilft nicht zum Sprung in die Weltelite, wenn die individuellen natürlichen Voraussetzungen nicht stimmen. Werden einmal gentechnisch aufgerüstete Superathleten in die Wettkämpfe gehen?

Ursprung der modernen Esskultur

Unsere heutigen Essgewohnheiten gehen auf Ideen der Aufklärung über eine gesunde Ernährungsweise zurück.